



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

E. T. S. DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN MIXTA DE ESTRUCTURAS DE APOYO DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA

POR

SANTIAGO MARTÍNEZ VARELA

DIRIGIDA POR

JOSÉ PARÍS LÓPEZ
IGNASI COLOMINAS EZPONDA

A CORUÑA - ABRIL 2012



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

E. T. S. DE INGENIEROS DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



TESIS DOCTORAL

OPTIMIZACIÓN MIXTA DE ESTRUCTURAS DE APOYO DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA

POR

SANTIAGO MARTÍNEZ VARELA
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

DIRIGIDA POR

JOSÉ PARÍS LÓPEZ
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

IGNASI COLOMINAS EZPONDA
Dr. Ingeniero Industrial

A CORUÑA - ABRIL 2012

A Ti

Índice general

Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XIII
1. Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos de la Tesis	4
1.3. Organización de la Tesis	5
2. Estado Actual del Conocimiento	7
2.1. Introducción	7
2.2. Estado Actual del Conocimiento del Cálculo Estructural de Torres de Alta Tensión	7
2.2.1. Características Estructurales	9
2.2.2. Tipos de Apoyos	11
2.2.3. Modularidad de las Estructuras de Transporte de Energía	16
2.2.4. Normativa Vigente	17
2.3. Estado Actual del Conocimiento de la Optimización de Torres de Alta Tensión	19
2.3.1. Evolución Histórica de la Optimización Estructural	19
2.3.2. Evolución Histórica de la Optimización Estructural de Torres de Alta Tensión	21
2.3.3. Resumen y Tendencia Actual	24
3. Planteamiento del Problema Estructural	27
3.1. Introducción	27
3.2. Modelos de Cálculo	27
3.2.1. Modelo de Nudos Articulados: MNA	29
3.2.2. Modelo de Nudos Rígidos: MNR	30
3.2.3. Comparativa entre MNA y MNR	31
3.3. Geometría de los Módulos o Bloques Considerados	36
3.3.1. Bases	36
3.3.2. Fuste	37

3.3.3.	Crucetas	39
3.3.4.	Cúpulas	40
3.4.	Acciones estructurales a considerar	41
3.4.1.	Peso Propio del Conductor	41
3.4.2.	Peso Propio de la Estructura	42
3.4.3.	Peso Propio de los Herrajes y Aisladores	43
3.4.4.	Hielo	44
3.4.5.	Viento	46
3.4.6.	Tense de los Conductores	49
3.5.	Combinaciones o Estados de Carga	51
3.5.1.	Primer Caso de Carga: Viento	51
3.5.2.	Segundo Caso de Carga: Hielo	52
3.5.3.	Tercer Caso de Carga: Desequilibrio de Tracciones	52
3.5.4.	Cuarto Caso de Carga: Rotura de Conductores	53
3.6.	Esquema Numérico Empleado	54
3.7.	Resumen	61
4.	Planteamiento del Problema de Optimización	65
4.1.	Introducción	65
4.2.	Función Objetivo	65
4.3.	Restricciones Empleadas para la Optimización	66
4.3.1.	Restricciones de Esbeltez Seccional o Local	67
4.3.2.	Restricciones de Esbeltez Elemental	68
4.3.3.	Restricciones sobre los Esfuerzos	69
4.3.4.	Aprovechamiento Estructural	72
4.4.	Variables de Diseño	74
4.4.1.	Variables Geométricas	74
4.4.2.	Variables Seccionales	75
4.5.	Algoritmos de optimización	76
4.5.1.	Algoritmo de Programación Lineal Continua (Simplex)	76
4.5.2.	Algoritmos de Optimización en Programación Entera Mixta	79
4.5.3.	Algoritmos de Optimización Difusa	80
4.5.4.	Algoritmos Genéticos	81
4.5.5.	Algoritmos de Optimización Estocástica (Simulated Annealing)	82
4.6.	Resumen	84
5.	Análisis de Sensibilidad	87
5.1.	Introducción	87
5.2.	Metodología de Diferenciación	88
5.2.1.	Diferenciación Numérica	89
5.2.2.	Diferenciación Analítica Directa	90
5.2.3.	Diferenciación mediante el Método de la Variable Adjunta	90
5.3.	Derivadas Elementales	90
5.3.1.	Derivada de la Longitud del Elemento	91
5.3.2.	Derivada de las Propiedades Geométricas de la Sección	92

5.3.3.	Derivada de las Fuerzas Exteriores	92
5.3.4.	Derivada de los Esfuerzos Elementales	95
5.4.	Análisis de Sensibilidad de las Restricciones	96
5.4.1.	Sensibilidad de las Restricciones en Esbeltez Seccional	97
5.4.2.	Sensibilidad de las Restricciones en Esbeltez Elemental	97
5.4.3.	Sensibilidad de las Restricciones en Esfuerzos	98
5.5.	Análisis de Sensibilidad de la Función Objetivo	100
5.6.	Resumen	101
6.	Metodología y Algoritmo Empleado	103
6.1.	Introducción	103
6.2.	Esquema General del Algoritmo	104
6.3.	Análisis de Sensibilidad y Entorno Factible	106
6.4.	Dirección de Máximo Descenso	108
6.5.	Simulated Annealing o Recocido Simulado	108
6.5.1.	Analogía con el Templado de los Metales	109
6.5.2.	El Algoritmo de Metropolis	110
6.5.3.	El Método de Monte Carlo	111
6.5.4.	Metodología Implementada	112
6.5.5.	La Función de Energía	112
6.5.6.	Compatibilización de Variables Discretas y Continuas (Suavizado)	115
6.5.7.	Convergencia del Algoritmo de Recocido Simulado	116
6.5.8.	Esquemas de Enfriamiento	119
6.6.	Implementación de los Criterios de Convergencia o Parada	129
6.7.	Resumen	129
7.	Ejemplos de Aplicación	133
7.1.	Introducción	133
7.2.	Ejemplo de aplicación 1: Torre de 400 kV	134
7.2.1.	Geometría Considerada	134
7.2.2.	Cargas Actuantes	139
7.2.3.	Estado Inicial de las Restricciones	141
7.2.4.	Resultados de la Optimización	142
7.3.	Ejemplo de aplicación 2: Torre de 220 kV	161
7.3.1.	Geometría considerada	162
7.3.2.	Cargas Actuantes	167
7.3.3.	Estado Inicial de las Restricciones	168
7.3.4.	Resultados de la Optimización	170
7.4.	Ejemplo de aplicación 3: Torre de 132 kV	190
7.4.1.	Geometría considerada	190
7.4.2.	Cargas actuantes	195
7.4.3.	Estado inicial de las restricciones	196
7.4.4.	Resultados de la Optimización	198
7.5.	Conclusiones al Funcionamiento del Algoritmo en los Ejemplos Prácticos	218

8. Conclusiones y Trabajos Futuros	223
8.1. Introducción	223
8.2. Conclusiones al Algoritmo Desarrollado	224
8.3. Conclusiones a los Resultados Obtenidos	226
8.4. Conclusiones Generales	227
8.5. Trabajos Futuros	230
Bibliografía	231

Índice de figuras

1.1. Ejemplos de configuración estructural de apoyos existentes en líneas de transporte de energía.	3
1.2. Geometría de diferentes módulos empleados en la construcción de torre de alta tensión.	4
2.1. Esquema de los diferentes tipos de elementos dentro de un bloque.	10
2.2. Esquema los diversos tipos de arriostramiento a disponer en una estructura de transporte de energía.	11
2.3. Esquema de unión atornillada y sección transversal de un perfil angular de alas simétricas.	12
2.4. Esquema del trazado de una línea de alta tensión con los diferentes tipos de apoyos según su funcionalidad.	13
2.5. Esquema del trazado de una línea de alta tensión con los diferentes tipos de apoyos de acuerdo a su posición en el trazado.	13
2.6. Diferentes tipos de apoyos en función del número de circuitos confluyentes, siendo a), b) y c) apoyos de doble circuito; d) apoyo simple circuito con disposición en capa; e) apoyo con simple circuito con disposición en bandera; f) apoyo con simple circuito con disposición a tresbolillo y e) apoyo de cuádruple circuito.	14
2.7. Diferentes esquemas de cúpulas con uno o dos puntos de fijación para los cables de guarda.	15
2.8. Ejemplos de configuraciones para el empleo de varios de conductores por fase.	16
2.9. Tipología general de bloques o módulos presentes en una torre de alta tensión.	17
3.1. Esquema resistente y ley de momentos flectores de una viga biapoyada.	30
3.2. Esquema resistente y ley de momentos flectores de una viga biempotrada.	30
3.3. Estructura en celosía de cálculo y esquema de fuerzas nodales aplicadas.	31
3.4. Geometría deformada de la estructura según el modelo estructural empleado.	32
3.5. Leyes de esfuerzos axiales obtenidas según el modelo de cálculo empleado.	33
3.6. Leyes de esfuerzos flectores obtenidas según el modelo de cálculo empleado.	33
3.7. Bloque Tipo K.	36
3.8. Bloques tipo Lambda (izquierda) y Súper Lambda (derecha).	37

3.9. Bloques tipo X (izquierda) y Súper X (derecha).	38
3.10. Bloques tipo X Arriotrado (izquierda) y Súper X Arriotrado (derecha). . .	38
3.11. Cruceta tipo Lateral.	39
3.12. Cruceta Corta.	39
3.13. Cruceta Larga.	40
3.14. Cúpula tipo Simple (izquierda) y Cúpula tipo Doble (derecha).	40
3.15. Esquema para la obtención del gravivano de un apoyo genérico en el que confluyen dos vanos diferentes.	41
3.16. Esquema de la descomposición nodal de una carga distribuida sobre una barra biarticulada.	42
3.17. Diferentes tipos de aisladores.	43
3.18. Disposición de aisladores tipo caperuza en cadenas de amarre y suspensión.	43
3.19. Esquema del manguito de hielo (e) en los conductores.	44
3.20. Diagrama de sobrecarga de hielo en función de la altitud de la zona.	45
3.21. Esquema de las fuerzas horizontales generadas por el viento sobre los con- ductores (eolovano).	48
3.22. Distribución de los tenses de los conductores sobre una torre de doble circuito.	50
3.23. Esquema de geometría y parámetros de catenaria.	50
3.24. Esquema de fuerzas para la cuarta hipótesis de carga en apoyos de ángulo y alineación según el número de cables por fase [61].	54
3.25. Esquema de fuerzas para la cuarta hipótesis de carga en apoyos de amarre según el número de cables por fase [61].	55
3.26. Esquema de fuerzas para la cuarta hipótesis de carga en apoyos de fin de línea según el número de cables por fase [61].	55
3.27. Esquema Resistente de una estructura de nudos articulados, sometida a car- gas aplicadas sobre los nodos.	56
3.28. Esquema deformacional de una barra o elemento sometido a tracción.	57
3.29. Ejes globales y locales de un elemento.	58
3.30. Fuerzas Nodales del elemento en ejes locales.	59
3.31. Axiles o esfuerzos elementales de la estructura.	61
4.1. Límites de esbeltez seccional recogidos en el Eurocódigo 3: Proyecto de Es- tructuras de Acero [16].	68
4.2. Curvas de pandeo definidas en el Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero [16].	71
4.3. Curva de pandeo para perfiles angulares definida en el Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero [16].	71
4.4. Gráfico de las variables representativas de los bloques que componen una torre de alta tensión.	74
4.5. Sección transversal de un perfil angular simétrico.	75
4.6. Esquema gráfico del funcionamiento del algoritmo SIMPLEX.	78
4.7. Esquema del entorno factible discreto generado en un problema de progra- mación entera mixta.	80
4.8. Funciones representativas de la teoría de conjuntos tradicional (izquierda) y difusa (derecha) [50].	81

5.1. Representación gráfica de las aproximaciones de primer, segundo y tercer orden para una función con una única variable.	88
5.2. Notación elemental de las coordenadas nodales.	91
6.1. Esquema General de la Metodología Implementada.	105
6.2. Determinación del entorno para las variables discretas.	107
6.3. Codificación empleada en la Figura 6.2.	107
6.4. Ilustración del problema de estimación de π por el método de Monte Carlo.	111
6.5. Evolución de las funciones de penalización interior, en función del coeficiente [63].	114
6.6. Evolución de las funciones de penalización exterior, en función del coeficiente [63].	114
6.7. Esquema del algoritmo de compatibilización implementado	117
6.8. Figura original de White, en la que se muestra la evolución de la energía frente a la temperatura.	120
6.9. Evolución de la probabilidad de aceptación de acuerdo al producto entre la temperatura y la constante de optimalidad ($T = k t$) y al incremento de la función objetivo δ	122
6.10. Evolución de la temperatura con el esquema Exponencial.	123
6.11. Evolución de la temperatura con el esquema propuesto por Geman y Geman.	125
6.12. Evolución de la temperatura con el esquema de Gidas.	126
6.13. Evolución de la temperatura con el Esquema de Lundy y Mees.	127
6.14. Gráfico de la Temperatura de Parada definido por Otten y Ginneken.	128
7.1. Torre de 400 kV: Ejemplos reales de torre de alta tensión de similares características a la analizada en el ejemplo 1.	134
7.2. Torre de 400 kV: Geometría de la torre analizada	136
7.3. Torre de 400 kV: Distribución de material dentro la estructura.	138
7.4. Torre de 400 kV: Sistema de cableado elegido.	139
7.5. Torre de 400 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez seccional.	141
7.6. Torre de 400 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez elemental.	142
7.7. Torre de 400 kV: Valor inicial de las restricciones de esfuerzos.	142
7.8. Torre de 400 kV: Geometría de la solución obtenida para la torre analizada.	144
7.9. Torre de 400 kV: Distribución de material en la estructura.	146
7.10. Torre de 400 kV: Envolvente de los esfuerzos obtenidos.	147
7.11. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección N.	148
7.12. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección E.	149
7.13. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección S.	150
7.14. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección W.	151
7.15. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 2.	152

7.16. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 3.	153
7.17. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito inferior.	154
7.18. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito intermedio.	155
7.19. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito superior.	156
7.20. Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada a los cables de guarda.	157
7.21. Torre de 400 kV: Comparación del tiempo de computación empleado considerando el Análisis de Sensibilidad (AS), o el cálculo directo.	158
7.22. Torre de 400 kV: Resultado del algoritmo en función de la temperatura inicial.	159
7.23. Torre de 400 kV: Evolución del algoritmo.	159
7.24. Torre de 400 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez seccional.	160
7.25. Torre de 400 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez elemental.	161
7.26. Torre de 400 kV: Valor final de las restricciones de esfuerzos.	161
7.27. Torre de 220 kV: Estructuras de alta tensión similares a la estudiada en el ejemplo de aplicación 2.	162
7.28. Torre de 220 kV: Geometría de la torre analizada.	164
7.29. Torre de 220 kV: Distribución de material dentro la estructura.	166
7.30. Torre de 220 kV: Sistema de cableado elegido.	167
7.31. Torre de 220 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez seccional.	169
7.32. Torre de 220 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez elemental.	169
7.33. Torre de 220 kV: Valor inicial de las restricciones de esfuerzos.	170
7.34. Torre de 220 kV: Distribución final de material en la estructura.	173
7.35. Torre de 220 kV: Geometría de la solución obtenida para la torre analizada.	175
7.36. Torre de 220 kV: Envolverte de los esfuerzos obtenidos.	176
7.37. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección N.	177
7.38. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección E.	178
7.39. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección S.	179
7.40. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección W.	180
7.41. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 2.	181
7.42. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 3.	182

7.43. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito inferior.	183
7.44. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito intermedio.	184
7.45. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito superior.	185
7.46. Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada a los cables de guarda.	186
7.47. Torre de 220 kV: Comparación del tiempo de computación empleado considerando el Análisis de Sensibilidad (AS), o el cálculo directo.	187
7.48. Torre de 220 kV: Resultado del algoritmo en función de la temperatura inicial.	188
7.49. Torre de 220 kV: Evolución del algoritmo durante la ejecución.	188
7.50. Torre de 220 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez seccional.	189
7.51. Torre de 220 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez elemental.	189
7.52. Torre de 220 kV: Valor final de las restricciones de esfuerzos.	190
7.53. Torre de 132 kV: Estructuras de alta tensión similares a la estudiada en el ejemplo de aplicación 3.	191
7.54. Torre de 132 kV: Geometría de la torre analizada.	192
7.55. Torre de 132 kV: Distribución final de material dentro la estructura.	194
7.56. Torre de 132 kV: Sistema de cableado elegido.	195
7.57. Torre de 132 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez seccional.	197
7.58. Torre de 132 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez elemental.	197
7.59. Torre de 132 kV: Valor inicial de las restricciones de esfuerzos.	198
7.60. Torre de 132 kV: Geometría de la solución obtenida para la torre analizada.	201
7.61. Torre de 132 kV: Distribución final de material dentro la estructura.	203
7.62. Torre de 132 kV: Envolvente de los esfuerzos obtenidos.	204
7.63. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección N.	205
7.64. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección E.	206
7.65. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección S.	207
7.66. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección W.	208
7.67. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 2.	209
7.68. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 3.	210

7.69. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito inferior.	211
7.70. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito intermedio.	212
7.71. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito superior.	213
7.72. Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada a los cables de guarda.	214
7.73. Torre de 132 kV: Comparación del tiempo de computación empleado considerando el Análisis de Sensibilidad (AS), o el cálculo directo.	215
7.74. Torre de 132 kV: Resultado del algoritmo en función de la temperatura inicial.	216
7.75. Torre de 132 kV: Evolución del algoritmo durante la ejecución.	216
7.76. Torre de 132 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez seccional.	217
7.77. Torre de 132 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez elemental.	217
7.78. Torre de 132 kV: Valor final de las restricciones de esfuerzos.	218
7.79. Esquema de funcionamiento del Algoritmo de Recocido Simulado.	219
7.80. Comparación de la evolución del algoritmo para diferentes temperaturas iniciales.	220
8.1. Algunos ejemplos de colapso de torres de alta tensión.	228

Índice de tablas

3.1. Comparativa de los desplazamientos nodales obtenidos según el modelo estructural empleado en el software comercial SAP2000 v10 [17].	32
3.2. Comparativa de los esfuerzos máximos obtenidos en las barras de la estructura según el modelo estructural empleado.	34
3.3. Comparativa de los resultados obtenidos con el software comercial SAP2000 v.10, con el límite de rotura de la sección.	35
3.4. Hipótesis de cálculo según el tipo de apoyo.	51
3.5. Grado de desequilibrio a aplicar en función de la tipología de apoyo, de la cadena de amarre, y de la tensión de servicio [59].	53
3.6. Grado de desequilibrio a aplicar en función de la tipología de apoyo, de la cadena de amarre, y de la tensión de servicio [61].	54
4.1. Coeficiente de Imperfección α según las curvas europeas de pandeo definidas en el Eurocódigo [16].	72
4.2. Propiedades mecánicas de un perfil angular de alas iguales.	76
4.3. Catálogo de perfiles empleados en la presente tesis.	77
6.1. Analogía entre la termodinámica y la optimización.	109
7.1. Torre de 400 kV: Listado de módulos que componen la estructura.	135
7.2. Torre de 400 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la estructura. . .	137
7.3. Torre de 400 kV: Cargas en toneladas sobre cada uno de los puntos de amarre de los conductores para las diferentes hipótesis de carga consideradas. . . .	140
7.4. Torre de 400 kV: Resumen de las principales características del algoritmo. .	143
7.5. Torre de 400 kV: Valores de las variables geométricas para la solución. . . .	143
7.6. Torre de 400 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría. . .	145
7.7. Torre de 220 kV: Listado de Módulos que componen la estructura.	163
7.8. Torre de 220 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría. . .	165
7.9. Torre de 220 kV: Cargas en toneladas sobre cada uno de los puntos de amarre de los conductores para las diferentes hipótesis de carga consideradas. . . .	168
7.10. Torre de 220 kV: Resumen de las principales características del algoritmo. .	171
7.11. Torre de 220 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría final.	172

7.12. Torre de 220 kV: Valores de las variables geométricas para la solución. . . .	174
7.13. Torre de 132 kV: Listado de módulos que componen la estructura.	191
7.14. Torre de 132 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría inicial.	193
7.15. Torre de 132 kV: Carga en toneladas sobre cada uno de los puntos de amarre de los conductores para las diferentes hipótesis de carga consideradas. . . .	196
7.16. Torre de 132 kV: Resumen de las principales características del algoritmo. .	199
7.17. Torre de 132 kV: Valores de los variables geométricas para la solución obtenida.	200
7.18. Torre de 132 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría final.	202

Agradecimientos

Resulta curioso que después de todo el trabajo realizado en la tesis, éstas sean las líneas más complicadas de redactar. Quizá para un técnico puede llegar a resultar sencillo expresar realidades, medidas o hechos en mayor o menor medida ponderables. Sin embargo el sentimiento o aquellos aspectos que escapen de la directa medida o del hecho palpable, pertenecen a un campo potencialmente abrumador.

Los agradecimientos no sólo son unas pocas líneas que rellenan un trabajo, cumplimentando una educada formalidad y dotando de humanidad a la técnica más áspera. Agradecer supone compartir los frutos de un trabajo con aquellos que directa o indirectamente lo han permitido. Es por ello que a pesar de rellenar un pequeño espacio, estas líneas son el pilar fundamental de todo el documento, ya que representan a las personas que hay detrás de él.

Casi cuatro han sido los años de duro trabajo y noches en vela, y muchas las personas que durante ese tiempo lo han hecho posible. No obstante no sería noble ni justo, olvidarse de todos aquellos que permitieron que esta aventura comenzase. En primer lugar a mi familia por haber sido la luz en el camino. A mi padre por haberme enseñado la máxima que rige mi vida, aquello que un santo una vez dijo “lo que hagas, hazlo bien”. A mi madre por ser el mayor ejemplo de humildad, tesón y corazón que nunca he visto. A mis hermanos, Antonio y Manuel, por enseñarme a no rendirme jamás y mostrarme siempre el verdadero valor de las cosas. Y a mis abuelos que desde su más tierna y dolorosa vigilia han sido siempre la flecha que marca el horizonte de dónde vengo y adónde voy.

En segundo lugar a mis profesores por permitirme todos ellos conocer y disfrutar de mi profesión, y en particular a mis tutores de tesis por acompañarme en todo momento durante este viaje que ahora termina. De forma concreta al Dr. José París López, por estar siempre disponible y dispuesto a escuchar a un pobre perdido; al Dr. Ignasi Colominas Ezponda por sus consejos y fiel dirección durante todo el proceso y por permitirme el honor de formar parte del Grupo de Investigación de Métodos Numéricos en la Ingeniería de la Universidad de La Coruña y por último al Dr. Fermín Navarrina Martínez padre intelectual del trabajo, sin el cual todo esto hubiese sido imposible.

No podría olvidarme tampoco de mis compañeros de trabajo, ni de mis responsables que hicieron posible la ardua tarea de compatibilizar una tesis con el exigente trabajo diario. En este sentido debo agradecer tanto a SOCOIN y en general a todo el Grupo UNIÓN FENOSA, empezando por D. Francisco Enseñat Berea, D. Francisco Javier Velasco Pascual de Zulueta, D. Raúl Suárez Álvarez y D. Rodrigo del Hoyo Fernández Gago, así como al Grupo IDOM al completo, con D. Pablo de la Puente Marjalizo y D. Juan Ramón López Laborda a la cabeza, por darme todas las facilidades posibles para finalizar mis estudios de doctorado.

Por otro lado no podría cerrar estas líneas sin mostrar un sincero agradecimiento a algo más que unos compañeros de trabajo: a mis buenos amigos Javier Álvarez Pérez, Víctor Guinaldo Blanco y Victoria Gómez Vilasánchez, por su apoyo y ayuda con los temas más electrizantes de la tesis.

Por último y aunque no sea un agradecimiento en sí, me gustaría dedicar unas pocas líneas a todos aquellos que se embarcan en el ardua tarea de compatibilizar la dura investigación doctoral con el intenso trabajo profesional. A todos vosotros que en algún momento os preguntáis si compensa, si merece la pena, a todos vosotros deciros: ¡ánimo!

Resumen

En la actualidad la energía eléctrica es la base fundamental del sistema de vida. Desde las actividades más básicas hasta las tareas más complejas requieren de cierto nivel de consumo energético. En la red energética actual existen diferentes entidades que le dan vida. Por un lado están los centros de generación, en donde se produce masivamente la energía; los centros de distribución y transporte, donde la electricidad se procesa permitiendo su distribución a los puntos de consumo; y finalmente las líneas de transporte. Éstas últimas son las responsables de la conexión entre las distintas entidades, posibilitando la redistribución de la energía a lo largo de todo el territorio.

La naturaleza más habitual de las líneas de transporte y distribución de energía eléctrica es la aérea. Esta tipología muestra ciertas ventajas sobre las líneas enterradas puesto que permite una fácil y rápida reparación, su construcción es más económica y reduce considerablemente los costes de mantenimiento. A lo largo de una línea aérea de alta tensión muchos son los puntos en los que se necesita un apoyo firme para la sustentación efectiva del cableado. Es por ello que las estructuras de apoyo de líneas de alta tensión poseen un carácter marcadamente repetitivo dentro del proyecto de una línea aérea de alta tensión.

Más concretamente, las torres de transporte de energía son estructuras metálicas en celosía generadas a partir de una sucesión modular de bloques de barras con una conectividad prefijada, caracterizados por sus dimensiones generales. El acero laminado galvanizado que las compone es uno de los materiales de construcción más caros, por lo que en el presupuesto total de una nueva línea de transporte, la partida destinada a la construcción de los apoyos representa la mayor parte del importe.

En la presente tesis doctoral se ha planteado una metodología que encara una optimización general del peso de las estructuras de transporte de energía, considerando la diferente naturaleza de las variables que caracterizan el problema. En este sentido, el algoritmo propuesto compatibiliza la naturaleza discreta de las secciones de las barras, con la naturaleza continua de las variables que definen la geometría y forma global de la estructura.

Esta metodología se basa en la algorítmica del Recocido Simulado, enunciada por Kirkpatrick a principios de los años '80. De este modo a partir de un proceso estocástico de pruebas basado en la analogía del templado de los metales se mapea el entorno de posibles soluciones. El método enunciado por Kirkpatrick permite adoptar soluciones que pueden empeorar la función objetivo, siempre y cuando éstas redunden en una mejor exploración del entorno factible y posibiliten una mejora final de la solución obtenida. De este modo se consigue una metodología capaz de optimizar la solución a un problema discreto o mixto, evitando posibles explosiones combinatorias.

Por último, dado que el algoritmo propuesto se fundamenta en un procedimiento estocástico basado en sucesivas pruebas, se ha compatibilizado el algoritmo de Kirkpatrick con un análisis de sensibilidad de primer orden, que proporciona un considerable ahorro en el coste computacional del método. Para mitigar posibles inexactitudes derivadas del análisis de sensibilidad, se implementan funciones de penalización interior dentro de la función objetivo considerada. Con todo ello se consigue una metodología general que permite la optimización de estructuras reales de transporte de energía, bajo un tiempo de computación razonable.

Resumo

Na actualidade a enerxía eléctrica é a base fundamental do sistema de vida. Dende as actividades máis básicas ata as tarefas máis complexas supoñen un certo nivel de consumo enerxético. Na rede enerxética actual existen diferentes entidades que lle dan vida. Por un lado están os centros xeración, onde se produce masivamente a enerxía; os centros de distribución e transpote, onde se procesa a electricidade permitindo a súa distribución ós puntos de consumo; e finalmente as liñas de transporte. Estas últimas son as responsables da conexión entre as distintas entidades, posibilitando a redistribución da enerxía ó longo do todo o territorio.

A natureza máis habitual das liñas de transporte e distribución de enerxía eléctrica é aérea. Esta tipoloxía mostra certas vantaxes sobre as liñas enterradas posto que permiten unha sinxela e rápida reparación, a súa construción é máis económica e reduce considerablemente os custos de mantemento. Ó longo dunha liña aérea de alta tensión moitos son os puntos nos que cómpre un apoio firme para a sustentación efectiva do cableado. É por iso que as estruturas de apoio de liñas de alta tensión poseen un carácter marcadamente repetitivo dentro do proxecto dunha liña aérea de alto voltaxe.

Máis concretamente, as torres de transporte de enerxía son estruturas metálicas en celosía xeradas a partir dunha sucesión modular de bloques de barras cunha conectividade prefixada, caracterizados polas súas dimensións xerais. O aceiro laminado galvanizado que as compón é un dos materiais de construción máis caros, polo que no orzamento total dunha nova liña de transporte, a partida reservada á construción dos apoios supón a maior parte do importe.

Na presente tese doutoral propónse unha metodoloxía que encara a optimización xeral do peso das estruturas de transporte de enerxía, considerando a diferente natureza das variables que caracterizan o problema. Neste sentido, o algoritmo proposto compatibiliza a natureza discreta das seccións das barras, coa natureza continua das variables xeométricas que definen a xeometría e a forma global da estrutura.

Esta metodoloxía baséase na algorítmica do Recocido Simulado, enunciado por Kirkpatrick a comezos dos anos '80. Deste xeito a partir dun proceso estocástico de probas baseado na analoxía do temperado dos metais, mapéase o entorno de posibles solucións. O método enunciado por Kirkpatrick permite adoptar solucións que poden empeorar a función obxectivo, sempre e cando estas redunden nunha mellor exploración do entorno factible e posibiliten unha mellora final da solución obtida. Deste xeito obtense unha metodoloxía capaz de optimizar a solución a un problema discreto ou mixto, evitando posibles explosións combinatorias.

Finalmente, dado que o algoritmo proposto fundaméntase nun procedemento estocástico baseado en sucesivas probas, compatibilízase o algoritmo de Kirkpatrick cunha análise de sensibilidade de primer orde, que proporciona un considerable aforro no custo computacional do método. Para mitigar posibles inexactitudes derivadas da análise de sensibilidade, impleméntanse funcións de penalización interior dentro da función obxectivo considerada. Con todo isto, conséguese unha metodoloxía xeral que permite a optimización de estruturas reais de transporte de enerxía, baixo un tempo de computación razoable.

Abstract

Mixed Optimization of the Support Structures of Energy Transport Lines

by

Santiago Martínez Varela

Civil Engineer

University of A Coruña

At present electricity is the one of the fundamental basis of our way of life. From the most basic activities to the most complex tasks require a certain level of energy consumption. In the current energy grid there are different elements: the generating centers, where energy is massively produced, distribution and transport centers, where electricity is processed allowing its distribution to the points of energy consumption, and finally the transmission lines. These transmission lines connect the generating centers with the energy consumption locations, allowing the redistribution of energy throughout the territory.

The most common type of the transmission lines and power distribution correspond to aerial installations. This typology shows certain advantages over buried lines because it allows easy and quick reparations, it significantly reduces maintenance costs and, in addition, line construction is cheaper. In the design and construction of a high-voltage transmission line there are many locations where a strong support is needed to effectively hold the conductors. That is the reason why the support structures of power lines are largely repeated in the project of a high voltage transmission line.

More specifically, power transmission towers are metallic latticed structures generated by a succession of modular blocks of bars with a predetermined connectivity. These structures are characterized by its overall dimensions. The galvanized steel-rolled bars used in this kind of structures are one of the most expensive building materials. So, the construction of these support structures represents the largest part of the construction budget of a new transmission line.

In this thesis a methodology that addresses a general optimization of the weight of the structures that support energy transmission lines. This formulation considers different kinds of variables that characterize the problem. The proposed algorithm allows to deal

with the discrete nature of the cross-sections of the bars and with the continuous nature of the variables that define the geometry and overall shape of the structure.

This methodology is based on the simulated annealing algorithm first proposed by Kirkpatrick in the early 80's. This algorithm is based on a stochastic approach that allows to search feasible solutions by considering the analogy of the optimization process with metal tempering phenomena. The method proposed by Kirkpatrick allows to adopt solutions that can worsen, if necessary, the objective function provided it results in a better exploration of feasible solutions and it drives to obtain improved final solutions. According to this idea the proposed methodology can be applied to the optimization a discrete or mixed problem, avoiding the analysis of combinatorial explosions.

Finally, since the proposed algorithm is based on a stochastic procedure, a first order sensitivity analysis has been combined with the Kirkpatrick formulation in order to achieve considerable savings in the computational cost of the method. In addition, penalty functions are implemented in the objective function in order to mitigate possible inaccuracies due to the first order approximation by means of sensitivity analysis. This penalty functions allows to state a general methodology for the optimization of real support structures for power transmission lines in a reasonable computing time.

“Comienza tu obra; comenzar es haber hecho la mitad; comienza de nuevo, y la obra quedará terminada.” Jacinto Benavente y Martínez (Dramaturgo Español. Madrid 1866 - Madrid 1954)

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción

La técnica ha proporcionado a la humanidad una incuestionable capacidad para sortear cualquier tipo de problema. Las ciudades en las que vivimos, las comodidades con las que actualmente contamos son fruto de un desarrollo técnico logrado a lo largo de los siglos, motivado por el carácter intelectualmente inquieto y emprendedor del ser humano.

Este carácter de continua superación es el responsable del progresivo perfeccionamiento técnico alcanzado, reflejo natural de la capacidad humana de dominar el entorno. Del mismo modo, este hecho ha permitido la perfecta adaptación al medio que lo rodea, transformándolo en la medida de lo posible en un mundo más amable y por consiguiente más habitable. Por todo ello se puede concluir que tanto ese afán perfeccionista como la misma búsqueda del progreso técnico no son más que la respuesta natural de adaptación a un medio a priori hostil.

Por otra parte, el perfeccionamiento técnico tiene en el ámbito de la optimización a su campo paradigmático, ya que en su sentido más amplio el objetivo fundamental corresponde con el de obtener los resultados que mejor satisfagan las necesidades humanas para el problema que pretenden resolver.

En un sentido más estricto, la optimización consiste en la búsqueda directa de la mejor solución posible a un problema concreto; por lo que resulta admisible definirla como la

máxima expresión de la capacidad humana de adaptación al entorno. Desde su nacimiento como teoría matemática a finales del siglo XIX y comienzos del XX, más concretamente a raíz de los estudios llevados a cabo por Maxwell y Michell en 1890 y 1904 respectivamente, la técnica ha experimentado grandes avances.

En la actualidad, la optimización se aplica en una amplia variedad de disciplinas con diversas finalidades, aunque siempre conservando el objetivo fundamental de conseguir la mayor racionalización posible de los recursos disponibles, maximizando el beneficio. Debido al elevado coste de las técnicas de optimización existentes, así como a la ausencia de un planteamiento general para su resolución, este tipo de análisis ha sido excluido de los estudios tradicionales de diseño, relegándose a exámenes más específicos en donde el coste de la optimización se ve justificado por un más que previsible ahorro económico.

Éste es el caso de pequeñas piezas de una cadena de montaje en las que un pequeño ahorro unitario en recursos supone una importante suma económica dado el carácter repetitivo de su fabricación. Por otro lado, el diseño de rutas comerciales o logísticas también justifican este tipo de estudios, dado que los ahorros potenciales son significativamente elevados al tratarse los costes de transporte como elementos de alto valor añadido.

En este sentido el diseño de torres de alta tensión se puede identificar como un problema intermedio a ambos ejemplos. En una línea de alta tensión los apoyos son elementos indispensables que permiten el sostenimiento de la línea de energía transmitiendo los esfuerzos al terreno. Este tipo de líneas unen los centros de generación con las subestaciones o bien estas últimas entre sí. De este modo pueden llegar a medir longitudes de decenas o centenares de kilómetros requiriendo una gran cantidad de este tipo de estructuras.

Por todo ello se puede decir que las torres de alta tensión son estructuras repetitivas que en el presupuesto total de la obra suponen la partida principal, por lo que conseguir una mejora en el diseño estructural supone un ahorro significativo.

Por otro lado, las torres de alta tensión deben permitir el transporte de la energía eléctrica a través de todo tipo de orografía minimizando la afección sobre el terreno y garantizando el suministro eléctrico a la totalidad del territorio. Este hecho ha motivado que la tipología estructural escogida de forma tradicional para este cometido sea la celosía metálica, debido fundamentalmente a su sencillez de montaje y facilidad de adaptación a terrenos especialmente accidentados.

En este sentido el acero laminado en estructuras es uno de los materiales de construcción más caros que existen por lo que se puede considerar un elemento de alto valor añadido.

Por estos motivos se justifica la aplicación de técnicas de optimización para este tipo de estructuras, ya que tanto por su carácter repetitivo como por el coste intrínseco del material empleado en su fabricación se prevé un ahorro considerable. De este modo el

objetivo fundamental de la optimización debe ser el de minimizar el volumen de material necesario, o lo que es lo mismo, reducir el peso total de la estructura garantizando su completa viabilidad funcional y mecánica.

En la presente tesis doctoral se estudia el problema de la minimización del peso en estructuras de barras articuladas. Como ejemplo real de análisis se aplican las técnicas desarrolladas al diseño de torres de alta tensión o estructuras de transporte de energía (figura 1.1).

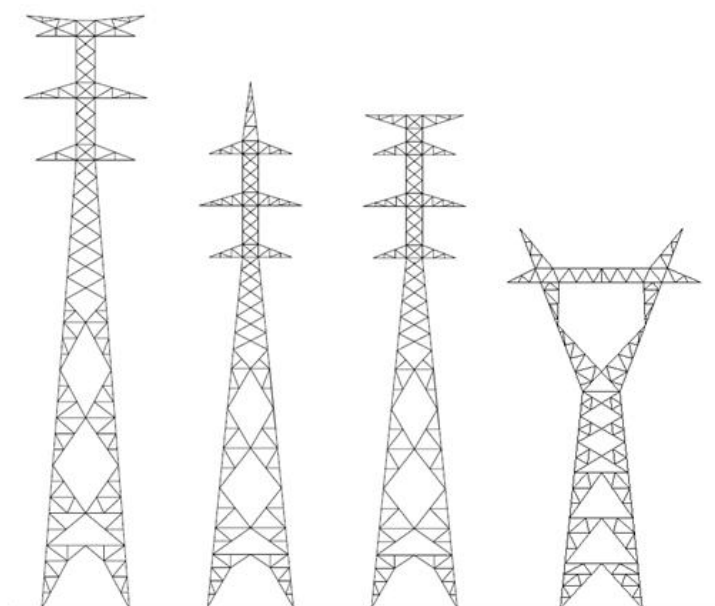


Figura 1.1: Ejemplos de configuración estructural de apoyos existentes en líneas de transporte de energía.

Las torres de alta tensión son estructuras metálicas, de hormigón, madera u otro material, con una composición modular. En este sentido, a través de una secuencia de diferentes grupos de barras con conectividad prefijada, o módulos, se genera la geometría global de la estructura (Figura 1.2). Estos módulos quedan definidos geométricamente por sus dimensiones en la base superior e inferior, así como por su altura. En el caso de los módulos que permitan la fijación del cableado en la estructura también será necesario definir la longitud y la altura de los voladizos, para fijar con precisión la posición del amarre de los cables. No obstante, estos valores vienen definidos fundamentalmente por criterios eléctricos, de separación entre cables y distancia a masa, antes que por criterios estructurales.

Por otra parte, dado que el material más común en este tipo de estructuras es el acero

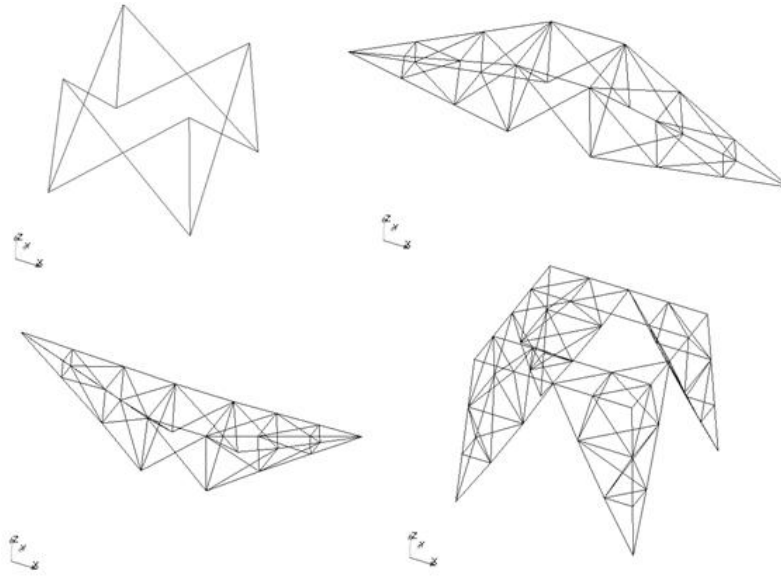


Figura 1.2: Geometría de diferentes módulos empleados en la construcción de torre de alta tensión.

laminado, los elementos que la componen deben ajustarse a perfiles laminados de catálogo para conseguir ser competitivos económicamente. Este hecho hace que para resolver el problema de optimización sea necesario tratar con variables continuas (dimensiones exteriores de las bases) y variables discretas (secciones metálicas de cada barra).

Una vez planteado el problema del diseño de las torres de alta tensión pasamos a definir los objetivos que se plantearán en esta tesis doctoral.

1.2. Objetivos de la Tesis

El principal objetivo de esta tesis doctoral es el de desarrollar una metodología que permita resolver de forma eficaz los problemas de optimización de estructuras de barras metálicas tridimensionales articuladas, y su aplicación en el diseño de estructuras de apoyo de líneas de transporte de energía. La optimización se plantea a través de la minimización del peso total de la estructura con restricciones en esfuerzos y esbeltez para diferentes casos de carga de acuerdo con lo prescrito en la normativa española de aplicación vigente. Para ello será necesario prestar especial atención al tratamiento conjunto de variables continuas y discretas, además de:

- Estudiar el estado del conocimiento actual con la finalidad de disponer de la mayor información posible para abordar el problema que se plantea con una mejor perspec-

tiva.

- Plantear un modelo de diseño que se ajuste a las necesidades del problema planteado, de forma que sea capaz de generar la geometría de la torre imponiendo las coacciones y solicitaciones exigidas por cada uno de los estados de carga a analizar según la normativa vigente.
- Desarrollar una metodología de cálculo estructural que permita obtener el comportamiento de la estructura frente a las solicitaciones que recoge la normativa.
- Proponer una metodología de optimización para el problema, que encare el tratamiento conjunto de las variables discretas y continuas, bajo las restricciones impuestas por la normativa vigente en los diferentes casos de carga a analizar.
- Estudiar las posibles limitaciones del modelo propuesto y proponer modificaciones que complementen y mejoren su comportamiento.
- Resolver ejemplos reales de torres de alta tensión existentes evaluando las diferencias obtenidas al aplicar la metodología de optimización propuesta.

En el siguiente epígrafe se detalla la organización seguida en el presente documento para exponer el trabajo realizado, en base a los objetivos que se acaban de definir.

1.3. Organización de la Tesis

Esta Tesis Doctoral está organizada en 8 capítulos incluyendo la propia introducción. El texto se articula de forma que en primer lugar se abordan los aspectos relacionados con el planteamiento general de los problemas de cálculo estructural y de optimización. Seguidamente se tratarán los capítulos relacionados con la metodología empleada y los resultados obtenidos para el caso de las torres de alta tensión.

Con todo ello, en este primer capítulo de introducción se presenta el problema de la optimización estructural de las torres de alta tensión así como la justificación práctica del análisis. Además, también se presentan los principales objetivos acometidos en la presente tesis.

En el capítulo segundo se introduce el estado actual del conocimiento tanto del cálculo estructural de las torres de alta tensión, como de la optimización de estructuras de apoyo en líneas de transporte de energía.

El tercer capítulo desarrolla el planteamiento estructural del problema, identificando las cargas actuantes, los casos de carga a estudiar y el modelo numérico de cálculo. En

el siguiente capítulo se plantea el problema de optimización y se encara el estudio de las necesidades de los algoritmos, identificando tanto las restricciones del problema como las variables de diseño. En este sentido, también se incluye una breve revisión de los principales métodos existentes.

El capítulo quinto desarrolla la formulación y la metodología empleada para la implementación eficaz del análisis de sensibilidad de primer orden en el marco del problema de optimización planteado.

En el sexto de los capítulos se profundiza en los diferentes aspectos que definen el algoritmo propuesto en la presente tesis. De este modo se explorarán las diversas particularidades del algoritmo, así como todos aquellos aspectos relevantes en la implementación del método.

Seguidamente el séptimo capítulo expone los diferentes resultados obtenidos al aplicar esta metodología en los ejemplos estudiados. Análogamente se incluye una breve interpretación estructural de la solución, así como el comportamiento numérico del algoritmo planteado.

Finalmente en el capítulo octavo se exponen las principales reflexiones y conclusiones obtenidas, planteando las posibles líneas futuras de investigación que se pueden plantear como continuación de la presente tesis.

“El progreso no consiste en aniquilar hoy el ayer, sino, al revés, en conservar aquella esencia del ayer que tuvo la virtud de crear ese hoy mejor.”
José Ortega y Gasset (Filósofo Español. Madrid 1883 - Madrid 1955)

Capítulo 2

Estado Actual del Conocimiento

2.1. Introducción

En el presente capítulo se presenta un breve análisis de la situación actual del conocimiento sobre la optimización y el cálculo estructural de torres de transporte de energía. En primer lugar se estudiará la evolución histórica del cálculo estructural, analizando las diferentes metodologías que a lo largo de los años se han desarrollado para el estudio de su respuesta estructural frente a solicitaciones exteriores de diversa naturaleza. Una vez expuesta la evolución de los algoritmos de cálculo estructural, se realizará una breve introducción histórica sobre la optimización estructural, particularizando su desarrollo en las estructuras de transporte de energía y comentando las técnicas más habituales en la actualidad para encarar la resolución del problema.

2.2. Estado Actual del Conocimiento del Cálculo Estructural de Torres de Alta Tensión

A lo largo de la historia, la evolución del cálculo estructural de las torres de alta tensión ha sido sensiblemente paralela a la del propio cálculo estructural. No obstante, dada su naturaleza y carácter repetitivo así como la escasa singularidad estructural que

las caracteriza, su tratamiento analítico nunca ha ido a la vanguardia de la tecnología. El cálculo de este tipo de estructuras se ha llevado a cabo tradicionalmente a través de técnicas como Maxwell-Cremona o Ritter. Únicamente la reciente aparición de las técnicas de cálculo computacional y la proliferación de herramientas de diseño asistido por ordenador ha promovido el empleo de métodos más sofisticados, como pueden ser las teorías de Cálculo Matricial o el Método de los Elementos Finitos. A continuación se expone una breve reseña histórica sobre el desarrollo del análisis estructural de los métodos anteriormente expuestos.

El primer método sistemático de análisis para estructuras estáticamente indeterminadas fue propuesto por James Clerk Maxwell (1830 - 1879) [51], profesor de la Universidad de Cambridge. El método se basaba en la igualdad de la energía interna de deformación de una estructura cargada y el trabajo externo realizado por las cargas aplicadas; igualdad que ya había sido enunciada con anterioridad por Clapeyron [27].

En su análisis presentó el Teorema de las Deformaciones Recíprocas, que por su brevedad y falta de ilustración no fue apreciado en su momento. Posteriormente completaría su publicación con su diagrama de fuerzas internas para celosías, en el que se combinaba en una sola figura todos los polígonos de fuerzas. Este tipo de diagramas fue extendido por Cremona [21].

Desde entonces el método de Maxwell - Cremona ha sido el método gráfico de referencia para el cálculo de los esfuerzos actuantes en las barras de estructuras de nudos articulados durante gran parte del siglo XX. El método evitaba el dibujo de los polígonos de fuerzas para cada nudo a través de un único gráfico con el que se iban obteniendo progresivamente los diferentes valores de las reacciones en cada barra.

Con posterioridad, en 1863, Ritter enunciará el Método de las Secciones para el Cálculo de Entramados [21], en el que se presenta un método analítico que permite, a través de una tramificación de la estructura y del empleo de los diagramas de sólido libre de los diferentes tramos, desacoplar los sistemas de ecuaciones generados por las condiciones de equilibrio. Este método presenta la ventaja de poder determinar aisladamente el esfuerzo actuante en una barra cualquiera sin necesidad de calcularse las solicitaciones correspondientes al resto de la estructura. Este hecho sin duda facilitaba el análisis general de la estructura puesto que agilizaba sensiblemente los cálculos al incorporar la experiencia particular de los fabricantes en el comportamiento de la torre. De este modo, la aplicación de reglas heurísticas sobre el funcionamiento de la estructura permitía reducir el número de barras a calcular, obviando aquellas partes de la misma que a priori estuviesen menos solicitadas.

Ya en el siglo XX, en la década de los 50, Turner, Clough, Martin y Topp inician la aplicación de los métodos matriciales de la rigidez que se habían enunciado durante el siglo anterior y que, dada su complejidad y coste computacional, habían sido relegados a un

segundo plano [1]. El método matricial de análisis de estructuras permite el cálculo de entramados hiperestáticos de barras a través del estudio de la relación entre los desplazamientos nodales y las cargas externas aplicadas. Asumiendo las hipótesis de elasticidad lineal de los materiales y pequeños desplazamientos, se obtiene una relación en función de la longitud, del material, de las características de la sección transversal, así como de las condiciones de apoyo de la barra, que se materializa a través de la matriz de rigidez de la estructura.

Finalmente los grandes avances obtenidos en la capacidad de cálculo de los ordenadores propició el desarrollo de técnicas más sofisticadas como el Método de los Elementos Finitos, que permite una aproximación genérica con suficiente precisión a los problemas con ecuaciones en derivadas parciales. De este modo, el MEF reformula un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales, o forma fuerte, en forma variacional, o forma débil. Con ello y basándose en una partición del dominio de las variables independientes en subdominios llamados elementos finitos, se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio generado por dichos elementos. De este modo la metodología permite convertir un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Habitualmente el MEF se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no-finita, que no obstante puede resolverse aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio finito, y por tanto, caracterizado con un número finito de ecuaciones.

2.2.1. Características Estructurales

Tal y como se expuso en el capítulo introductorio, las estructuras de transporte de energía, también conocidas como torres de alta tensión, son estructuras metálicas de generación modular. De este modo, su forma o geometría global se compone de la superposición de bloques o grupos de barras con una conectividad prefijada. Este hecho hace que la tipología de torre condicione en gran medida las características de los diferentes bloques o módulos, siendo definidos únicamente a través de sus dimensiones globales.

A su vez cada bloque está compuesto por diferentes tipos de elementos atendiendo a su función dentro de la estructura. Tal y como puede comprobarse en la Figura 2.1 se distinguen los siguientes tipos de elementos:

- Montantes: son los elementos principales de la estructura, y los responsables de asumir la mayor parte de los esfuerzos a los que se ve sometida la torre.
- Celosías: son aquellos elementos de carácter secundario que permiten asegurar la estabilidad de la estructura.

- Rellenos o Redundantes: son todos aquellos elementos cuya finalidad principal es la de arriostrar a los montantes y celosías, con el objetivo de reducir su longitud de pandeo.

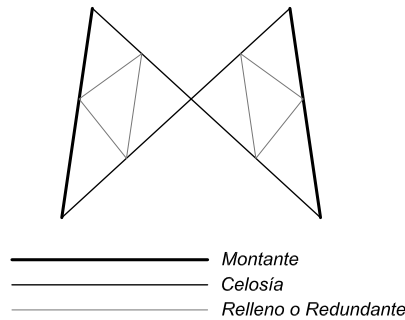


Figura 2.1: Esquema de los diferentes tipos de elementos dentro de un bloque.

La utilización de estructuras de celosía de acero se muestra casi siempre más ventajosa dado que:

- son fácilmente adaptables a cualquier forma o altura de la torre.
- son fácilmente divisibles en secciones adecuadas para su transporte y montaje.
- son fáciles de reparar, recrecer y reforzar, facilitando de igual modo, los trabajos de tesado del cableado.
- son duraderas si están adecuadamente protegidas contra la corrosión.

La torre de cuatro patas directamente apoyadas sobre los cimientos es, con mucho, la solución estructural más habitual debido fundamentalmente a las siguientes ventajas:

- la torre ocupa un área relativamente pequeña a nivel del suelo.
- la compresión de las cargas transversales y longitudinales se reparte entre dos de las patas de la misma.
- la sección transversal cuadrada o rectangular (cuatro patas) resiste la torsión mejor que una torre triangular (tres patas).
- la sección transversal es muy adecuada para la utilización de perfiles angulares, ya que las conexiones pueden realizarse de forma muy sencilla.

Por otra parte y de forma complementaria, la elección del sistema de arriostramiento depende de la magnitud de la carga y de las longitudes de las barras. El más habitual es el arriostramiento en cruz de San Andrés, aunque pueden considerarse otras tipologías como el arriostramiento en K con barras redundantes que reduzcan la longitud de pandeo de los elementos principales, tal y como puede comprobarse en la Figura 2.2. La principal ventaja de esta última tipología radica en que la longitud de pandeo de la barra de arriostramiento a compresión se ve afectada positivamente por la barra de arriostramiento a tracción, incluso en relación con la flexión perpendicular a la cara de la torre.

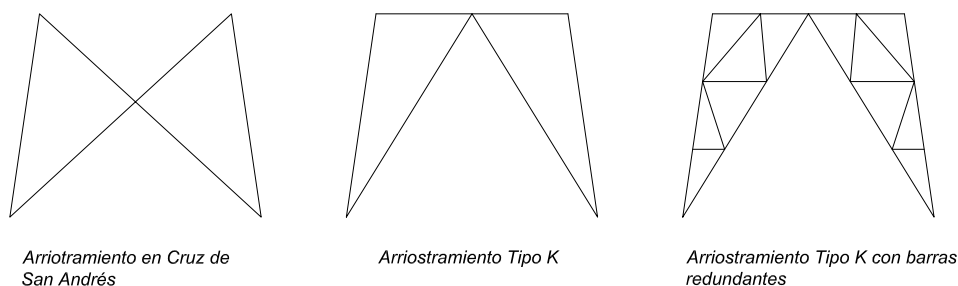


Figura 2.2: Esquema los diversos tipos de arriostramiento a disponer en una estructura de transporte de energía.

Esta disposición ofrece más espacio para las uniones y puede ofrecer considerables ventajas en relación con la carga de pandeo de los montantes. Esta ventaja destaca especialmente en los perfiles angulares cuando se utilizan de acuerdo al esquema de la Figura 2.3, dado que reducen la longitud de pandeo entorno al eje principal de menor inercia $v-v$.

Por otro lado en las estructuras de transporte de energía estos elementos se conectan habitualmente a través de uniones de tipo atornillado. Este tipo de uniones poseen una rigidez muy inferior a la que se puede conseguir con las uniones soldadas, por lo que el comportamiento estructural deja de corresponderse con empotramientos totales a flexión, pasando a ser conexiones de tipo semiarticulado o articulado.

No obstante, las uniones atornilladas pueden sustituirse fácilmente por uniones soldadas sin cambios importantes en el proyecto, excepto en el caso de estructuras pequeñas, donde generalmente se prefieren las uniones atornilladas ya que ofrecen la oportunidad de montar las piezas estructurales sin dañar la protección contra la corrosión.

2.2.2. Tipos de Apoyos

Las torres de alta tensión pueden clasificarse en relación con su funcionalidad, posición en el trazado o el número de circuitos concurrentes en la estructura. En función de cada

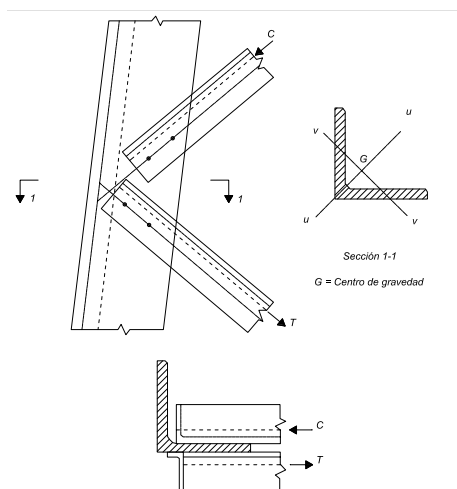


Figura 2.3: Esquema de unión atornillada y sección transversal de un perfil angular de alas simétricas.

uno de estos tres conceptos la torre adopta ciertas características que afectan de modo significativo a su geometría y comportamiento estructural. A continuación se detalla una breve descripción de cada una de las principales tipologías de apoyos existentes.

2.2.2.1. Según su Funcionalidad

La funcionalidad de los apoyos de alta tensión está íntimamente relacionada con la disposición de la cadena de aisladores, así como con la misión que dentro de la serie de apoyos de la línea se le asocie. De este modo, de acuerdo con la Figura 2.4, se pueden distinguir las siguientes tipologías:

- **Apoyos de Suspensión:** son aquellos apoyos en los que las cadenas de aisladores se encuentran suspendidas del punto de fijación de la estructura. En este caso el cableado no transmite esfuerzos longitudinales sobre la estructura.
- **Apoyos de Amarre:** son aquellos cuya cadena de aislamiento es de tipo amarre. El cableado en este tipo de apoyos transmite cargas longitudinales sobre los puntos de fijación de la estructura.
- **Apoyos de Anclaje:** corresponden a apoyos con cadenas de aislamiento de tipo amarre, diseñados expresamente para proporcionar un punto firme en la línea. De este modo limitarán la propagación de esfuerzos longitudinales de carácter excepcional a lo largo de la línea. La diferencia con los apoyos de amarre estriba en que suponen puntos fijos en la línea, por lo que su exigencia estructural es superior a los apoyos de amarre convencionales.

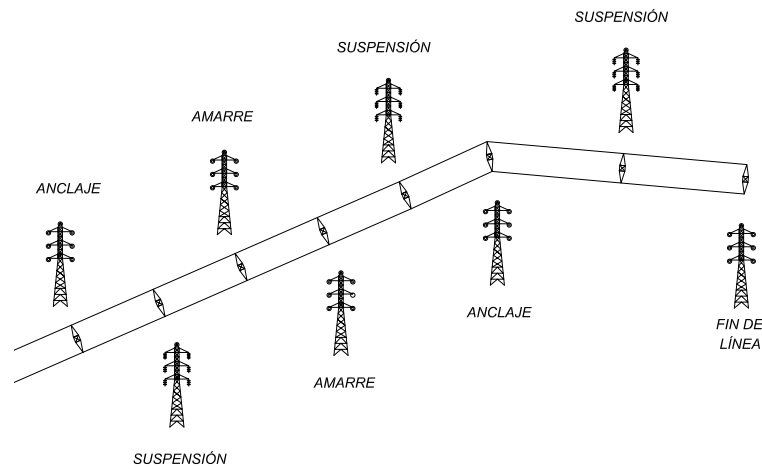


Figura 2.4: Esquema del trazado de una línea de alta tensión con los diferentes tipos de apoyos según su funcionalidad.

- Apoyos de Principio o Fin de Línea: son aquellos apoyos que coinciden con el primero y último de una línea de alta tensión. En este caso las cadenas de aislamiento son de amarre, ya que están destinados a soportar en sentido longitudinal las solicitaciones del haz completo de conductores en un solo sentido.

2.2.2.2. Según su Posición en el Trazado

En función de la posición relativa del apoyo respecto de la línea se pueden distinguir los siguientes tipos de apoyos recogidos en la Figura 2.5:

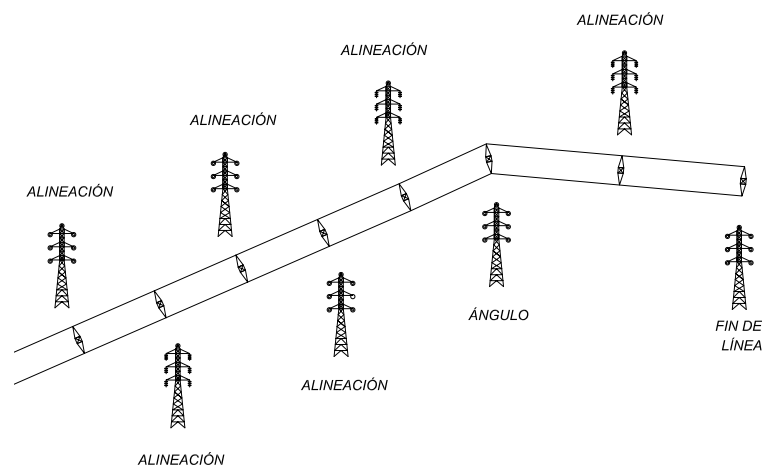


Figura 2.5: Esquema del trazado de una línea de alta tensión con los diferentes tipos de apoyos de acuerdo a su posición en el trazado.

- Apoyo de Alineación: cualquier tipo de apoyo que se encuentre en un tramo recto de la línea de alta tensión en la que se inscribe.
- Apoyo de Ángulo: cualquier tipo de apoyo que se encuentre en el vértice generado por la intersección de dos alineaciones rectilíneas de la misma línea de transporte de energía.

Existen otro tipo de apoyos que permiten la derivación de una línea, el paso aéreo subterráneo del cableado o cualquier otro tipo de funciones que de acuerdo con el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] se catalogan dentro de la categoría genérica de Apoyos Especiales.

2.2.2.3. Según el Número de Circuitos

Las estructuras de transporte de energía permiten el sostenimiento de varios circuitos a la vez, posibilitando la conexión de los centros de generación con los diferentes puntos de consumo. De este modo, en función del número de circuitos que un apoyo o torre de alta tensión es capaz de soportar, se pueden clasificar del siguiente modo (Figura 2.6):

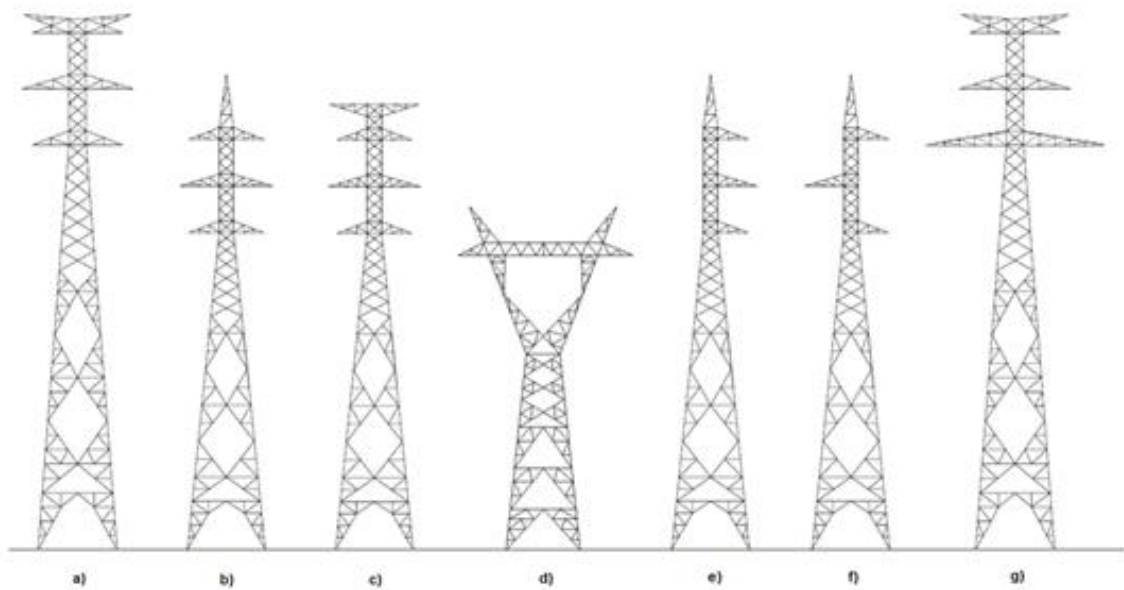


Figura 2.6: Diferentes tipos de apoyos en función del número de circuitos confluyentes, siendo a), b) y c) apoyos de doble circuito; d) apoyo simple circuito con disposición en capa; e) apoyo con simple circuito con disposición en bandera; f) apoyo con simple circuito con disposición a tresbolillo y g) apoyo de cuádruple circuito.

- Simple Circuito: soportan un único circuito. Suelen adoptarse en zonas próximas a los centros de consumo.
- Doble Circuito: diseñadas para el transporte de dos circuitos diferentes de alta tensión.
- Cuádruple Circuito: configuraciones que permiten el soporte de hasta cuatro circuitos diferentes. Son comunes a la salida de las subestaciones o de los centros de generación.

Del mismo modo, las torres de alta tensión permiten el transporte de líneas de comunicación por fibra óptica. Estos cables son los situados en la cúpula o parte superior de la estructura y reciben el nombre de cables de guarda (Figura 2.7). Estos cables poseen además una función de protección de la línea contra las sobretensiones derivadas de fenómenos atmosféricos (rayos...). Su forma de actuar consiste en crear una pantalla protectora sobre los conductores que absorba las posibles sobretensiones y las desvíe a través de la puesta a tierra del apoyo. En este sentido y dependiendo de la situación de los conductores en el apoyo, se pueden colocar entre uno y dos cables de guarda.

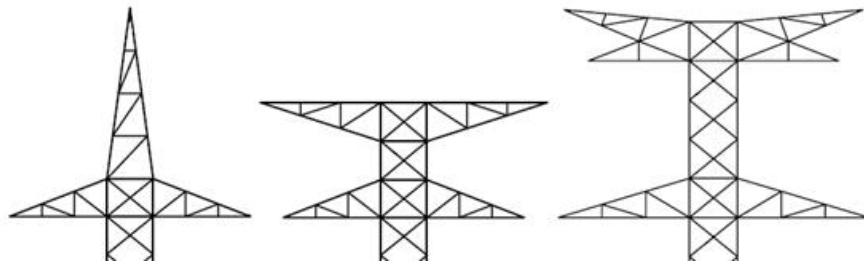


Figura 2.7: Diferentes esquemas de cúpulas con uno o dos puntos de fijación para los cables de guarda.

2.2.2.4. Según el Número de Conductores por Fase

Las líneas compuestas por varios cables unipolares por fase son una buena solución para llevar a cabo el transporte de elevados voltajes. Para el transporte hasta los centros de consumo situados a grandes distancias de los puntos de generación, la energía eléctrica producida debe ser transformada elevando su voltaje o tensión. En este sentido, para un determinado nivel de potencia a transmitir, elevar el voltaje reduce la intensidad de corriente eléctrica circulante y, en consecuencia, las pérdidas por efecto Joule.

En el caso de que la máxima elevación de voltaje admitida por el cable no permita reducir la intensidad hasta un valor lo suficientemente bajo como para conseguir pérdidas aceptables en la línea, resulta necesario incrementar la sección de conductor. En este sentido la forma más directa de incrementar la sección pasa por recurrir a diámetros mayores,

aunque puede que los diámetros comerciales resulten insuficientes. Es por ello que se recurre al empleo de varios conductores para transportar una misma fase.

En la práctica pueden llegar a emplearse las siguientes configuraciones (Figura 2.8):

- Simplex: corresponde con la configuración estándar en la que se destina un único conductor para cada fase del circuito.
- Dúplex: disposición compuesta por una pareja de conductores por cada fase del circuito.
- Tríplex: configuración que consta de tres conductores por fase.
- Cuádruplex: disposición en la que se destinan cuatro conductores para una misma fase.

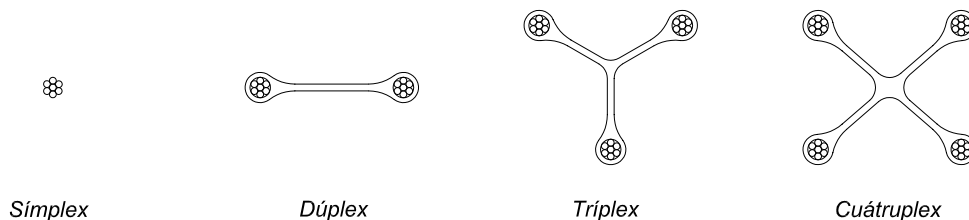


Figura 2.8: Ejemplos de configuraciones para el empleo de varios de conductores por fase.

Las configuraciones más habituales corresponden a esquemas de dúplex y cuádruplex, siendo excepcionales las ocasiones en las que se pasa de 4 conductores por fase.

2.2.3. Modularidad de las Estructuras de Transporte de Energía

Como se expuso con anterioridad una de las características fundamentales de las estructuras de transporte de energía es su generación modular. Este hecho motiva que las diferentes estructuras a diseñar se obtengan a través de la composición de diversos grupos prefijados de barras con una conectividad predeterminada.

De este modo y de acuerdo con la funcionalidad de la torre se define la sucesión de módulos o bloques de barras que componen la estructura. Los diferentes bloques de barras se pueden dividir en cuatro grandes tipologías a tenor de su posición y función en la estructura (Figura 2.9):

- Cúpulas: bloques que permiten el amarre de los cables de guarda y coronan la estructura de transporte.

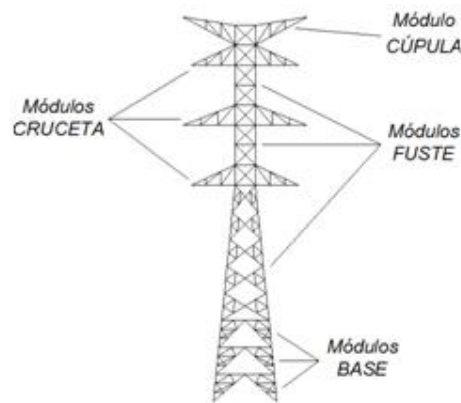


Figura 2.9: Tipología general de bloques o módulos presentes en una torre de alta tensión.

- Fustes: módulos que conectan el resto de bloques entre sí para configurar la torre.
- Crucetas: bloques cuya finalidad es la de permitir el amarre de los conductores.
- Bases: módulos inferiores de la estructura que permiten la transmisión de los esfuerzos a la cimentación.

En los próximos capítulos se tratarán en mayor profundidad los diferentes aspectos que caracterizan a cada uno de los módulos o bloques considerados en la presente tesis.

2.2.4. Normativa Vigente

Las estructuras metálicas de torres de alta tensión, están dentro del rango de aplicación de las normas UNE EN 50421-2005 [13], para Líneas Eléctricas Aéreas de entre 1 y 45 kV, y la UNE EN 50341-2001 [14] para Líneas Eléctricas Aéreas de más de 45 kV. En ellas se especifican las condiciones generales que deben aplicarse tanto para el diseño como para su construcción, con el fin de garantizar que la línea satisfaga los estándares técnicos necesarios para verificar con suficiente grado de solvencia la seguridad de las personas, del mantenimiento, del funcionamiento y del medio ambiente. Esta norma nace del proceso de estandarización de la normativa electrotécnica europea promovido por CENELEC, dividiéndose en dos partes: una primera de requisitos mínimos generales para todos los países y una segunda parte específica de cada país que debe compatibilizarse con el resto de normas de carácter europeo.

En lo referente a los requisitos generales, la norma diferencia entre dos tipos de aproximaciones para modelar el comportamiento y las solicitaciones de la estructura. Una primera aproximación general basada en el estudio probabilístico de las acciones sobre la torre, y

una segunda basada en el estudio empírico de ensayos y medidas tomadas en campo. En el primero de los casos la aproximación viene avalada por la teoría estadística definida en la norma IEC 60826 [34], mientras que en el segundo de los casos, la metodología reserva un importante grado de libertad a cada país para particularizar el procedimiento a las características y particularidades de su entorno.

En el apartado estructural, los requisitos nacionales impuestos en España parten del Eurocódigo N°3 [15] desarrollado en 1993 por el Observatorio de la Construcción y que posteriormente fue particularizado para las estructuras de edificación por el Ministerio de Vivienda a través del Código Técnico de la Edificación en 2006 [60], y reactualizado en el año 2008 [16]. Dicho Eurocódigo deroga a la antigua normativa de Estructuras de Acero en la Edificación de 1995 [57], que integraba un conjunto de normas básicas de la edificación relativas a la construcción en acero. Con todo ello, en la actualidad el análisis de estructuras metálicas está delimitado por el Código Técnico de la Edificación [60], para todos aquellos elementos de acero que formen parte de un proyecto de edificación, así como por el Eurocódigo N°3 [16], en sus diferentes apartados, para el resto de los casos.

No obstante, resulta habitual que en esta materia se aplique normativa americana específica para torres de alta tensión. En este caso se trata de la ASCE 1097 [4], desarrollada por la Asociación Americana de la Ingeniería Civil y que ahonda en el comportamiento de estructuras metálicas de transporte de energía. Este hecho se debe a que la normativa española permite la comprobación estructural de acuerdo con la normativa vigente o con cualquier otra normativa lo suficientemente probada o abalada por la experiencia.

En cuanto a las especificaciones relativas al régimen eléctrico, España ha dispuesto un Reglamento en vigor desde 1968 que ha contribuido a alcanzar unos niveles de calidad y seguridad reconocidos en el resto del mundo. Tras aproximadamente cuarenta años de vigencia, en Marzo de 2008, el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio decidió actualizar el reglamento emitiendo un nuevo texto [59], que modernizaba las premisas que sirvieron para crear una red estable de transporte y distribución de energía eléctrica en nuestro país. Dicho texto representa los requisitos nacionales de los que se habla en las normas UNE EN 50421-2005 [13] y UNE EN 50341-2001 [14], exponiendo, entre otras, tanto la naturaleza y los valores de las diferentes cargas como las hipótesis de cálculo a las que someter la estructura. La filosofía de diseño expuesta en este reglamento se basa en un conjunto de fórmulas empíricas avaladas por la experiencia de las empresas distribuidoras y de transporte, aportando una metodología alternativa al procedimiento estadístico descrito en las anteriores normas. Más concretamente, tal y como definen Moreno y Garnacho [61], consiste en una particularización del modelo estadístico de la norma a los valores concretos basados en la experiencia, eliminándose los grados de libertad que el procedimiento normativo

proporciona para el diseño de las líneas eléctricas aéreas.

En los próximos capítulos y de acuerdo con el objeto de la presente tesis, se estudiarán en mayor profundidad las diferentes premisas desarrolladas por el articulado del nuevo Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59].

2.3. Estado Actual del Conocimiento de la Optimización de Torres de Alta Tensión

A continuación se recoge un resumen de los principales avances recogidos a lo largo de la historia dentro del campo de la Optimización Estructural. Del mismo modo, se hará especial hincapié en los principales estudios realizados de forma particular sobre estructuras de transporte de energía o bien sobre estructuras tipo celosía.

2.3.1. Evolución Histórica de la Optimización Estructural

El campo de la optimización, pese a experimentar un profundo desarrollo recientemente, cuenta con aportaciones pioneras como las de Galileo [23], Bernouilli [6], Parent [67] [68], Lagrange [42] [43] o Clausen [12], entre otros, que durante los siglos XVII, XVIII y XIX, lograron formular diseños de mínimo peso para vigas y columnas. Posteriormente entre los siglos XIX y XX, los trabajos realizados por Maxwell [52], Lévy [45] y Michell [55] en torno al diseño óptimo de estructuras articuladas bidimensionales, pueden considerarse como el verdadero punto de partida de esta disciplina.

Con la llegada de la II Guerra Mundial, la escalada bélica focalizó el interés científico en la reducción de los costes en la industria aeronáutica. De este modo se llevaron a cabo importantes avances en el diseño de elementos estructurales de alta resistencia y mínimo peso, tales como paneles, rigidizadores y perfiles metálicos.

Más tarde en los años 50, Klein [39], Pearson [71] y Schmit [77] establecieron los principios fundamentales de lo que hoy conocemos como optimización estructural, dotando de un marco conceptual a una disciplina caracterizada hasta ese momento por una evolución desordenada.

La aportación fundamental de Klein [39], consistió en plantear el problema general de optimización como un problema estándar de programación no lineal, consistente en minimizar una función objetivo sometida a una serie de restricciones expresadas en forma de ecuaciones o inecuaciones.

Por otra parte Pearson [71], fue el precursor de la integración de las técnicas de análisis estructural y los métodos de optimización en un esquema coherente de diseño. Finalmente

Schmit [77] siguiendo las ideas de Pearson propuso la integración de métodos de cálculo estructural más ambiciosos, como el Método de los Elementos Finitos, con métodos de programación no lineal. Más concretamente demostró que las reglas heurísticas de los criterios de optimalidad, ampliamente utilizados en la época, no eran adecuados siendo necesario aplicar métodos de programación lineal más sofisticados.

De acuerdo con la reseña histórica planteada por Navarrina [63] y Valera [81], la optimización moderna dispone de diversas técnicas de resolución del problema de minimización con restricciones planteado por Klein, las cuales se pueden agrupar en torno a las siguientes categorías:

- Métodos intuitivos.
- Métodos basados en Criterios de Optimalidad.
- Métodos basados en algoritmos de Programación Matemática.

Los métodos intuitivos, herederos de los métodos de los años 50, se basan en realizar hipótesis simplificadoras sobre las restricciones que condicionan el diseño. Este hecho motiva que su aplicación se vea limitada en la práctica a ciertos casos muy particulares.

Los métodos basados en Criterios de Optimalidad se caracterizan por imponer una serie de restricciones adicionales que se han de cumplir en el mínimo. Como resulta complejo establecer a priori dichas restricciones, estos métodos también tienen una aplicabilidad reducida a ciertas familias de problemas.

Finalmente, los métodos basados en algoritmos de Programación Matemática más habituales son los Métodos de Descenso Generalizados, los Métodos basados en las condiciones de Khun Tucker [37] [41], los Métodos de Reducción a Problemas de Minimización no restringida y los Métodos de Reducción a Problemas Específicos. El lector que desee profundizar en estos métodos puede remitirse a los trabajos de Navarrina [63] y Tàrrech [80].

En conclusión, cabe destacar que, a pesar de su sistematización a partir de 1960, la optimización estructural carece de una metodología de validez general para la resolución del problema de optimización planteado por Klein [39]. Es por ello que a menudo no resulta evidente la elección de un método en concreto para resolver un problema de optimización en particular.

En los próximos capítulos se tratarán más específicamente algunos de los métodos que a lo largo de la historia se han aplicado para la resolución del problema que nos ocupa.

2.3.2. Evolución Histórica de la Optimización Estructural de Torres de Alta Tensión

Los inicios de la optimización de estructuras de transporte de energía comienza en la década de los '70 con los trabajos de Sheppard y Palmer [79] acerca de la optimización de estructuras de nudos articulados y del diseño óptimo de torres de transporte. En sus estudios, se encaraba la minimización del peso del cuerpo de la estructura bajo la cruceta más cercana al terreno en una torre de doble circuito de alta tensión. Asimismo tanto la distancia entre el terreno y la parte inferior de la cruceta, como las dimensiones generales del fuste se consideraban una constante de diseño. De este modo y valiéndose del esquema modular que compone este tipo de estructuras, el algoritmo propuesto definía tanto la altura óptima como el tipo de cada uno de los módulos a disponer, detallando las dimensiones óptimas de las barras que los formaban.

El algoritmo de optimización elegido por Sheppard y Palmer [79] fue un algoritmo de programación dinámica. Este tipo de métodos requieren que el problema tratado sea divisible en etapas de forma que cada una de ellas afecte a las que le siguen pero no a las que le preceden. Este hecho permite reducir la optimización total a una serie de optimizaciones parciales, simplificando enormemente el problema de optimización y disminuyendo el tiempo de computación. Sin embargo, para que el cálculo estructural resultase divisible en etapas, Sheppard y Palmer llevaron a cabo una serie de hipótesis para poder considerar la isostaticidad de la estructura articulada de la torre. Del mismo modo también realizaron ciertas simplificaciones en los casos de carga actuantes, despreciando el efecto del peso propio y encarando el cálculo de viento de forma aproximada.

Los trabajos de Sheppard y Palmer, fueron posteriormente desarrollados por Raj y Durrant [75] que, utilizando también la programación dinámica, encararon el problema ampliando el campo de variables involucradas.

Posteriormente, Hanssen [28] estudió la optimización estructural de las torres de alta tensión basándose en la subestructuración del modelo articulado de la torre de alta tensión. De este modo consideró el carácter discreto del coste a minimizar adoptando una función discontinua dependiente de diversas variables geométricas. Esta discontinuidad se debe al hecho de que el mercado de perfiles de acero sólo permite escoger entre un determinado catálogo de secciones. También restringe la geometría de la torre mediante una serie de restricciones explícitas lineales. Con todo ello resuelve el problema de minimizar una función objetivo implícita y discontinua con variables continuas y restricciones lineales explícitas mediante el método combinado aleatorio de búsqueda directa de Box [7] y el método de búsqueda directa de Powell [74]. Para la optimización de las secciones de cada una de las

barras, este estudio se basa en la débil hiperestaticidad que presentan este tipo de estructuras y que permite que la optimización de las secciones según un criterio de diseño a máxima tensión sea bastante precisa. Es importante reseñar que en este modelo Hanssen [28] tuvo en cuenta los efectos que la tornillería de las uniones generaba sobre la elongación de las barras.

La cuarta referencia es el estudio de Majid y Tang [47], en el cual se analizaba la optimización de una estructura asimilable a una torre de alta tensión muy simplificada a través de la aplicación de un algoritmo de optimización para estructuras articuladas espaciales propuesto por los autores. Dicha metodología linealizaba tanto la función objetivo como las restricciones, simplificando el problema hasta poder aplicar métodos de programación lineal para su resolución. Las variables de diseño consideradas en este estudio fueron las secciones de las barras, agrupadas en varios tipos de acuerdo al elemento, así como la variación de las coordenadas horizontales de los nodos de la estructura. Por otro lado también se tuvo en cuenta el efecto tanto del peso de los conductores concurrentes en la torre como de la acción del viento sobre la estructura. Finalmente, se incluían restricciones en los esfuerzos de tracción, así como de pandeo local y en los desplazamientos horizontales de los nodos.

Casi paralelamente a Hanssen, Saka [76] publica sus estudios de optimización de una torre de alta tensión con una sola cruceta considerando únicamente como variables de diseño las secciones de las barras. El método desarrollado por Saka se basa en un criterio de optimalidad derivado del Lagrangiano del problema de optimización. Este criterio se traduce en una ecuación que expresa la sección de las barras en función de los multiplicadores de Lagrange. En este caso Saka considera como restricciones del problema el esfuerzo máximo admisible a tracción, los desplazamientos y los efectos del pandeo. Este proceso iterativo se encuentra especialmente desarrollado para el caso de estructuras isostáticas, condicionante que obliga a Saka a simplificar su modelo estructural. Finalmente, y aunque considera perfiles angulares simétricos como secciones transversales tipo, no tiene en cuenta el carácter discreto que el mercado les impone.

A finales de los años 80 Felix y Vanderplaats [20] estudiaron el caso de una torre de alta tensión de una sola cruceta considerando la estructura como articulada. Para ello desarrollaron un método de optimización de estructuras articuladas espaciales considerando como variables de diseño las áreas de las barras y las coordenadas de los nodos. El algoritmo de optimización planteado recogía restricciones por esfuerzo máximo admisible a tracción, pandeo, desplazamiento y valor mínimo de la primera frecuencia fundamental de la estructura. No obstante este método no tiene en cuenta el peso propio de los elementos de la estructura, ni el carácter discreto de las secciones.

El método desarrollado se basaba en una técnica multiproceso en la que en primer

lugar se linealizan las restricciones potencialmente críticas en función de la inversa del área de las barras, para proceder a la optimización seccional de la estructura. Una vez obtenido el resultado de esta primera fase, el algoritmo procede a ejecutar la optimización de la geometría de la torre. Para ello el método encuentra primero una dirección de avance y posteriormente cuánto se avanza en dicha dirección. Una vez finalizado el ciclo y, por tanto, obtenida una nueva geometría se vuelven a optimizar las secciones de las barras reiniciando el proceso.

Ya en los años 90 Valera y Navarrina [81], propusieron una metodología generalista para la minimización del peso total de una estructura de transporte conforme a las especificaciones recogidas en la normativa española vigente en el momento. La optimización de la forma estructural se realiza mediante un algoritmo de programación lineal secuencial con búsqueda unidireccional cuadrática (SLP-QLS) [63], aplicando un modelo estructural isostático de nudos articulados plano. La elección del perfil que corresponde a cada elemento estructural se realiza posteriormente, en función de los esfuerzos axiales recién calculados, y de acuerdo con las tablas de propiedades mecánicas de las secciones de acero laminado disponibles. Esta técnica no asegura el óptimo absoluto de la estructura, pero en la práctica proporciona resultados satisfactorios. En cualquier caso dicha metodología se ha continuado desarrollando [64], hasta el punto de servir como punto de partida de la presente tesis.

De forma paralela a los trabajos de Valera y Navarrina [81] el problema de optimización de estructuras de transporte de energía eléctrica ha sido encarado a través de la implementación de técnicas de inteligencia computacional, en particular a raíz de las publicaciones de Vieswara Rao [82], y del desarrollo de las técnicas multiobjetivo.

Vieswara Rao [82] plantea la resolución del problema a través del empleo de técnicas de lógica difusa. Esta teoría definida por Zhade [86] se ha erigido con el tiempo como una herramienta eficaz para el tratamiento de variables discretas con un cierto componente heurístico a través del empleo de funciones de pertenencia o membresía que modelan el grado de imprecisión del problema. Su aplicación la justifica Rao a partir del tratamiento de las restricciones del problema como auténticas inecuaciones, apartándose del tratamiento tradicional de las mismas.

Por otra parte, Castro [10] propuso el tratamiento del problema a través de la implementación de algoritmos genéticos. En este sentido, partiendo de un modelo estructural plano de nudos articulados, consigue minimizar el peso total de una torre de alta tensión de simple circuito con una única cruceta. No obstante los algoritmos genéticos presentan ciertos problemas en cuanto a su generalidad dado que requieren en su mayoría un proceso de calibrado que evite deficiencias en la convergencia global de la solución.

Con todo ello se puede observar que no existe un consenso sólido entre la comunidad

científica sobre la metodología a emplear para la resolución del problema de optimización de estructuras de transporte de energía. La naturaleza del problema así como sus singularidades han impedido el desarrollo de una metodología general que permita encarar el problema de forma efectiva. En el siguiente epígrafe se tratarán de manera sintetizada las principales conclusiones extraídas de este breve análisis histórico, identificando la tendencia actual de los estudios realizados.

2.3.3. Resumen y Tendencia Actual

Como resumen a este breve repaso del estado del arte de la optimización estructural de torres metálicas de transporte de energía, cabe destacar que los estudios de optimización llevados a cabo hasta el momento han encarado el problema desde un punto de vista académico, asumiendo diversas hipótesis que dificultaban su aplicación práctica directa. En este sentido, sólo algunos autores tienen en cuenta el peso propio de las barras de la estructura, y prácticamente ninguno combina varios casos de carga en el proceso de optimización. Del mismo modo, son escasos los trabajos en los que se considera de modo fiable el carácter discreto de las secciones, y en ningún caso existe un modelo generalista que permita obtener el mínimo discreto del problema.

Por otra parte, y de forma genérica, en todos los casos se han considerado restricciones al máximo esfuerzo admisible a tracción y al pandeo local de las barras, asimilando la estructura a un modelo de nudos articulados y simplificando el análisis a una estructura de tipo isostático. Dependiendo de los autores se trata como plana o espacial, siendo excepcionales los casos en los que se estudian las variaciones que las uniones atornilladas pueden aplicar sobre la estructura.

En cualquier caso, no se observa la existencia de acuerdo generalizado sobre el algoritmo de optimización a emplear, utilizando cada autor su metodología particular. No obstante, en la actualidad existe una cierta tendencia al empleo de técnicas de inteligencia computacional, como es el caso de los algoritmos genéticos, aunque sin un consenso claro. A tenor de la falta de un algoritmo de referencia, así como a la inexistencia de un análisis práctico que aborde de modo completo el problema de ingeniería real existente en torno a la optimización del peso de las estructuras de transporte de energía, la presente tesis doctoral pretende proponer una metodología de referencia que permita su resolución, eliminando todos aquellos condicionantes que limiten su aplicación práctica. En este sentido se plantea la resolución estructural empleando un modelo de nudos articulados tridimensional completo, encarando de forma conjunta todas las hipótesis de carga recogidas en la normativa vigente. Del mismo modo, y desde el punto de vista de la optimización, el algoritmo considerará el carácter

discreto de las secciones que componen la estructura así como el carácter continuo de la geometría general de la torre, integrándolos con el objetivo de satisfacer los condicionantes exigidos por la normativa de aplicación.

En los próximos capítulos se analizarán los diferentes aspectos que definen el problema, describiendo la metodología propuesta para su resolución. En primer lugar se tratarán los aspectos relacionados con el problema estructural, identificando las cargas actuantes, las combinaciones de estudio y el modelo de cálculo empleado. Posteriormente se tratarán las restricciones requeridas por la norma, así como todos aquellos aspectos que caractericen el problema de optimización. Por último se expondrá en detalle la metodología de optimización desarrollada, así como los resultados obtenidos de la aplicación del algoritmo a ejemplos reales de torres existentes en líneas de alta tensión.

“Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión.” Eduardo Torroja (Ingeniero de Caminos Español. Madrid 1899 - Madrid 1961)

Capítulo 3

Planteamiento del Problema Estructural

3.1. Introducción

En el presente capítulo se tratará en profundidad el modelo de cálculo empleado para la resolución del problema estructural previo a la implementación del algoritmo de optimización. Más concretamente se tratarán los diversos aspectos del modelo de cálculo desarrollado, definiendo la geometría modular de los bloques que forman la estructura, las acciones consideradas y las hipótesis de carga en las que se combinan.

3.2. Modelos de Cálculo

Tal y como se expone en la norma UNE EN 50341 [14], las líneas eléctricas se diseñan y construyen para que sean capaces de desempeñar sus funciones con el suficiente nivel de fiabilidad, evitando tanto el colapso progresivo de la línea como cualquier tipo de daño personal o material a lo largo de la totalidad de la vida útil de la instalación. En este sentido el período medio de diseño de las instalaciones de transporte de energía se cifra en 50 años, pudiendo variar entre los 30 y los 80 años en función de la importancia de la línea.

También se expone en la citada norma que el modelo de cálculo empleado debe ser

apropiado y estar basado en teorías ya establecidas y verificadas en la práctica. En general, el análisis de este tipo de estructuras se realiza en base a las siguientes hipótesis:

- la estructura de la torre se comporta como una estructura autoportante sin apoyo de ninguno de los conductores.
- la torre se proyecta sólo para cargas estáticas o casi estáticas.

Tal y como se define en el Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero [33] estas hipótesis no reflejan demasiado bien el comportamiento real del sistema en su conjunto, es decir torres y conductores. No obstante, permiten una aproximación más que suficiente.

Por otro lado, y en lo referente al modelo estructural, el cálculo tradicional de este tipo de estructuras se ha llevado a cabo considerando estructuras de nudos articulados y analizando únicamente los elementos principales (montantes y celosías). De este modo la contribución de los elementos secundarios o redundantes se estudiaba como meras restricciones que alteraban la longitud libre de pandeo de los elementos principales. Este hecho se vio motivado en gran medida por las técnicas tradicionales de cálculo estructural empleadas en el campo de las estructuras de transporte de energía. No obstante el desarrollo técnico de los últimos años reconoce necesario considerar el efecto sobre el reparto estructural que este tipo de elementos puede llegar a generar, sobre todo en aquellos tipos de estructuras con una mayor densidad de barras.

Del mismo modo las publicaciones más recientes [33] así como las normativas de reciente aprobación sugieren además la consideración de las uniones como total o parcialmente rígidas, dotándolas de leyes lineales de comportamiento frente a la flexión. Este hecho se lleva a cabo para garantizar el diseño eficaz de las uniones en la estructura. En cualquier caso la normativa americana [4] publicada por la ASCE en 1997, defiende el empleo de modelos articulados, debido a la mayor agilidad y sencillez que ofrecen, así como al suficiente grado de precisión que proporcionan.

La consideración de la existencia de nudos semirrígidos o rígidos sobre la estructura no sólo altera el comportamiento de la misma frente a la flexión sino que exige la consideración de las excentricidades derivadas de la falta de coincidencia de los ejes de gravedad de las barras en las uniones. Este hecho supone un significativo incremento de la complejidad del análisis estructural, que hasta hace relativamente poco tiempo resultaba inabordable con la suficiente agilidad y eficacia.

Por otro lado, los eurocódigos de cálculo de estructuras metálicas [16] definen una serie de valores de rigidez límite de la unión para determinar su comportamiento. en función de los cuales se puede considerar como:

- Nominalmente Articuladas: son aquéllas en las que no se desarrollan momentos significativos que puedan afectar a los miembros de la estructura [60]. Por lo tanto son capaces de transmitir las fuerzas y de soportar las rotaciones obtenidas en el cálculo.
- Rígidas: aquéllas cuya deformación (movimientos relativos entre los extremos de las piezas que unen), tal y como expone el CTE [60], no tiene una influencia significativa sobre la distribución de los esfuerzos en la estructura ni sobre su deformación global. De este modo deben ser capaces de transmitir las fuerzas y momentos obtenidos en el cálculo.
- Semirrígidas: aquéllas que no corresponden a ninguna de las categorías anteriores. Establecen la interacción prevista (basada, por ejemplo en las curvas características de momento - rotación) entre los miembros de la unión y serán capaces de transmitir parcialmente las fuerzas y momentos obtenidos en el cálculo [60].

En el caso que nos ocupa, las uniones normalmente empleadas en las estructuras de transporte de energía se encuentran en el límite entre las nominalmente articuladas y las semirrígidas, por lo que conceptualmente aceptar la hipótesis de nudos articulados no supone alejarse significativamente del comportamiento real de la estructura.

En cualquier caso en el marco de la presente tesis se ha planteado el análisis estructural de las torres de alta tensión de acuerdo a un modelo de nudos articulados. A continuación se describirá la formulación matemática de cada uno de los modelos, concluyendo con una comparativa de los resultados obtenidos entre ambos para el caso de una estructura tridimensional de barras.

3.2.1. Modelo de Nudos Articulados: MNA

En un modelo de nudos articulados, los extremos de cada uno de los elementos que componen la estructura poseen la suficiente flexibilidad como para permitir su rotación. De este modo el conjunto de la rigidez natural de las uniones no es suficiente como para permitir una redistribución de los momentos flectores en la estructura, motivo por lo que la flexión generada por las cargas interiores a cada elemento es íntegramente soportada por el propio elemento.

De acuerdo con el tipo de estructura planteada en la presente tesis, únicamente existirán cargas uniformemente repartidas de acuerdo a la longitud de los elementos, y cargas puntuales sobre sus nodos. Por ello el comportamiento local de las barras que componen la estructura puede asimilarse al de una viga biapoyada sometida a una carga longitudinal uniformemente repartida tal y como se sintetiza en la Figura 3.1.

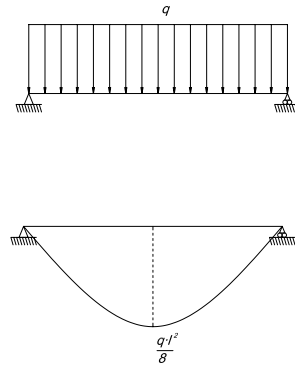


Figura 3.1: Esquema resistente y ley de momentos flectores de una viga biapoyada.

3.2.2. Modelo de Nudos Rígidos: MNR

En este tipo de modelos la rigidez total de la estructura se incrementa, por lo que las deformaciones se reducen considerablemente. Este hecho supone una modificación en la ley de flectores de la estructura traducida en la aparición de momentos de reacción en los extremos de cada elemento y por consiguiente en las uniones que los conectan, conforme se muestra en la Figura 3.2.

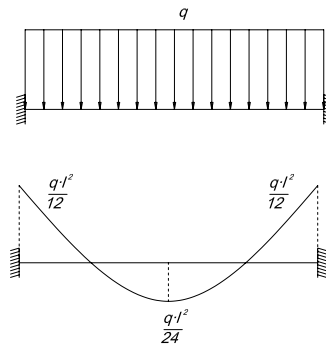


Figura 3.2: Esquema resistente y ley de momentos flectores de una viga biempotrada.

Por otra parte, si en lugar de nudos rígidos asumimos una cierta flexibilidad en el nudo, la rigidez del modelo disminuiría, reduciéndose por consiguiente las deformaciones esperadas. Este tipo de modelos reciben el nombre de nudos semirrígidos o bien de muelles a flexión, ya que la reacción en los extremos depende de una ley función del ángulo de giro en el nudo. En este caso la ley de momentos obtenida se encuentra comprendida entre los límites de la viga biapoyada y la viga biempotrada.

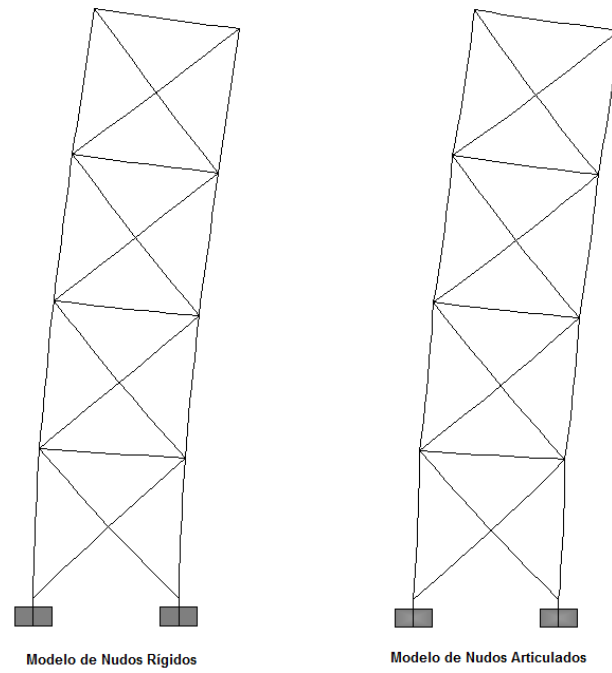


Figura 3.4: Geometría deformada de la estructura según el modelo estructural empleado.

Nodo	Modelo Continuo		Modelo Articulado		Variación	
	$X(m)$	$Z(m)$	$X(m)$	$Z(m)$	$X(\%)$	$Z(\%)$
1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00
2	0.04657	0.00705	0.04662	0.00706	0.10	0.14
3	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00
4	0.04639	-0.00700	0.04644	-0.00701	0.11	0.14
5	0.00634	-0.00378	0.00635	-0.00379	0.16	0.00
6	0.00649	0.00373	0.00650	0.00373	0.15	0.00
7	0.01796	-0.00589	0.01798	-0.00589	0.11	0.00
8	0.01809	0.00583	0.01811	0.00584	0.11	0.10
9	0.03194	-0.00680	0.03197	-0.00681	0.09	0.15
10	0.03208	0.00678	0.03211	0.00679	0.09	0.15

Tabla 3.1: Comparativa de los desplazamientos nodales obtenidos según el modelo estructural empleado en el software comercial SAP2000 v10 [17].

De acuerdo con los resultados obtenidos que se muestran tanto en la tabla 3.2 como en las Figuras 3.5 y 3.6, se puede observar como las diferencias son apenas apreciables

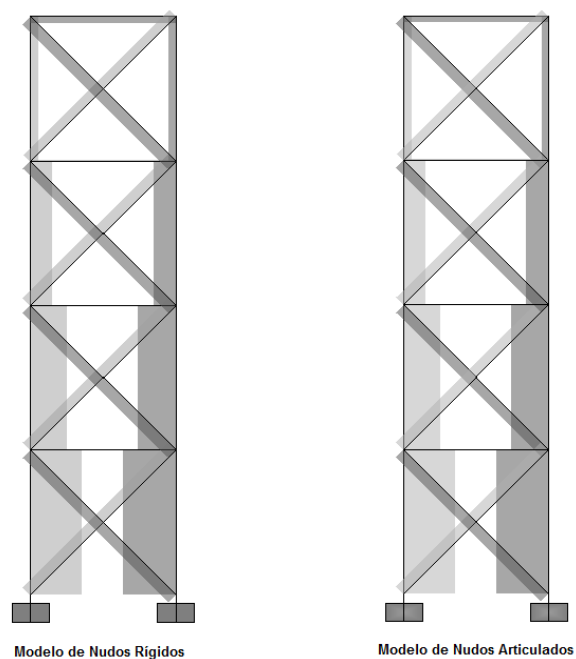


Figura 3.5: Leyes de esfuerzos axiales obtenidas según el modelo de cálculo empleado.

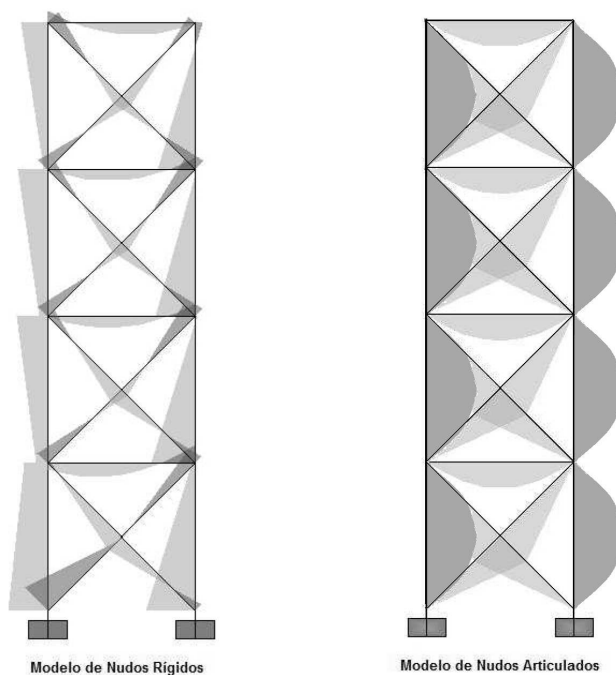


Figura 3.6: Leyes de esfuerzos flectores obtenidas según el modelo de cálculo empleado.

Elem.	Nodos extremos		Modelo continuo		Modelo articulado		Variación(%)	
	Inic.	Fin.	N (N)	M(N m)	N(N)	M(N m)	$\ N\ $	$\ M\ $
1	1	6	286281.30	538.43	286526.43	-340.00	0.09	36.85
2	6	8	162153.44	415.24	162327.10	-340.00	0.11	18.12
3	8	10	72939.95	408.76	73084.75	-340.00	0.20	16.82
4	8	2	20630.79	366.25	20715.52	-340.00	0.41	7.17
5	3	5	-290680.20	671.85	-290946.49	-340.00	0.09	49.39
6	5	7	-161822.20	607.23	-161985.42	-340.00	0.10	44.01
7	7	9	-70650.20	538.31	-70788.57	-340.00	0.20	36.84
8	9	4	-15327.81	509.22	-15437.40	-340.00	0.71	33.23
9	1	5	98107.61	-437.69	98733.98	334.41	0.64	23.60
10	3	6	-106282.38	255.95	-106460.70	334.41	0.17	30.65
11	6	5	-11004.79	-248.63	-11033.77	236.46	0.26	4.89
12	6	7	71073.96	-237.34	71605.66	334.41	0.75	40.90
13	5	8	-82101.44	209.18	-82168.01	334.41	0.08	59.87
14	8	7	-10435.56	-172.91	-10432.23	236.46	0.03	36.75
15	8	9	45947.87	-207.77	46462.27	334.41	1.12	60.95
16	7	10	-55844.90	185.38	-55890.59	334.41	0.08	80.39
17	10	9	-10702.43	-163.16	-10720.20	236.46	0.17	44.93
18	10	4	20511.15	-189.26	20592.11	334.41	0.39	76.69
19	9	2	-30290.33	-205.25	-30339.96	334.41	0.16	62.93
20	2	4	-14158.90	169.84	-14053.61	236.46	0.74	39.23

Tabla 3.2: Comparativa de los esfuerzos máximos obtenidos en las barras de la estructura según el modelo estructural empleado.

para los axiles, mientras que para el caso de la flexión, la variación obtenida es sustancial. No obstante, y dado que se ha empleado un sistema de cargas similar al actuante en una estructura de transporte de energía, debe observarse que los esfuerzos de flexión generados sobre los elementos son muy bajos. En la tabla 3.3 se observa la magnitud de los esfuerzos obtenidos en relación con la carga de rotura del material empleado. En el caso que nos ocupa se ha considerado el material de referencia en las estructuras de transporte de energía, acero S275, y cuya carga de rotura se cifra en 410 MPa de acuerdo con la normativa vigente.

Los resultados obtenidos muestran como la flexión en ningún caso es superior al 10 % de la carga de rotura, por lo que en el marco de la presente tesis se ha optado por despreciar el

Elemento	Esfuerzo		% Carga Rotura	
	$N(N)$	$M(N\ m)$	$N(\%)$	$M(\%)$
1	286526.43	538.43	47.77	7.01
2	162327.10	415.24	27.06	5.41
3	73084.75	408.76	12.18	5.32
4	20715.52	366.25	3.45	4.77
5	-290946.49	671.85	-48.50	8.75
6	-161985.42	607.23	-27.01	7.91
7	-70788.57	538.31	-11.80	7.01
8	-15437.40	509.22	-2.57	6.63
9	98733.98	-437.69	16.46	-5.71
10	-106460.70	255.95	-17.75	3.33
11	-11033.77	-248.63	-1.83	-3.24
12	71605.66	-237.34	11.93	-3.09
13	-82168.01	209.18	-13.69	2.72
14	-10432.23	-172.91	-1.74	-2.25
15	46462.27	-207.77	7.74	-2.70
16	-55890.59	185.38	-9.31	2.41
17	-10720.20	-163.16	-1.78	-2.12
18	20592.11	-189.26	3.43	-2.46
19	-30339.96	-205.25	-5.05	-2.67
20	-14053.61	169.84	-2.34	2.21

Tabla 3.3: Comparativa de los resultados obtenidos con el software comercial SAP2000 v.10, con el límite de rotura de la sección.

efecto de la flexión sobre la estructura. Dado que, por lo general, el proceso de optimización ajusta el diseño a sus límites resistentes, éste debe limitarse de forma que la estructura no alcance su límite de rotura. Por este motivo se considerará que el material se mantiene en su rama elástica impidiendo el desarrollo plástico de la sección hasta la rotura. En cualquier caso, debe recordarse que en el modelo de ejemplo analizado únicamente se han considerado cargas exteriores horizontales, por lo que el modelo responde a una sollicitación de flexión global pura. En este sentido, los sistemas de cargas que actúan sobre las torres de alta tensión también incorporan cargas exteriores verticales hecho que reduce significativamente el efecto de la flexión sobre la estructura.

3.3. Geometría de los Módulos o Bloques Considerados

Una vez expuestos los modelos de cálculo empleados para encarar el problema estructural, se procede a exponer con mayor profundidad los diferentes bloques considerados que configuran la geometría de la torre. Cabe notar que los módulos adoptados para la generación de las estructuras de la presente tesis se han obtenido a través del estudio de las geometrías más comunes dispuestas en torres reales, así como del estudio de las diversas tipologías empleadas por las empresas de montaje. En cualquier caso la geometría de los bloques puede variar de un fabricante a otro, formando parte de la tecnología propia de cada empresa.

3.3.1. Bases

Las bases son los módulos inferiores de la estructura que transmiten directamente las cargas a la cimentación. Como módulos de base el autor de la tesis ha considerado el siguiente:

- Tipo K: se genera a partir de siete materiales diferentes repartidos por un total de 138 elementos que comunican 48 nodos. Se dispone como base principal de las torres de mayor altura, tanto en solitario como en una sucesión de módulos del mismo tipo. Su geometría se caracteriza a través de las dimensiones de sus bases superior e inferior, así como por la altura total del bloque (Figura 3.7).

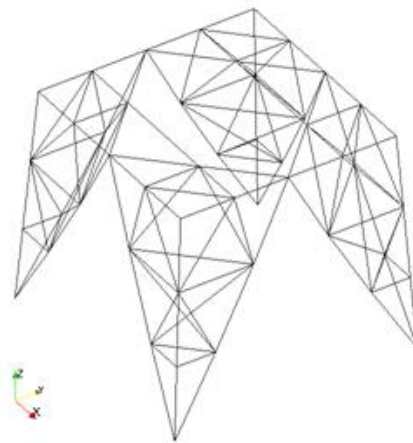


Figura 3.7: Bloque Tipo K.

3.3.2. Fuste

Los fustes son aquellos módulos que conectan el resto de los bloques entre sí, y que generan el cuerpo de la estructura. Al igual que en el resto de las tipologías, y de acuerdo con las geometrías más comunes dispuestas en estructuras de transporte de energía reales se han considerado los siguientes bloques tipo fuste:

- Tipo Lambda: corresponde con el módulo de fuste más débil. Se genera a través de la composición de 8 elementos con dos tipos de materiales diferentes, que conectan 8 nodos situados en las esquinas del módulo. Se define al igual que el resto de los módulos tipo fuste a partir de las dimensiones de sus bases y su altura (Figura 3.8). Este tipo de módulos generan por sí solos mecanismos, siendo necesario intercalarlos con otro tipo de bloques para garantizar la estabilidad del conjunto.
- Tipo Súper Lambda: se trata de la evolución natural de los módulos tipo Lambda. Con esta configuración basada en 8 nodos conectados a través de 12 elementos con 3 materiales diferentes, se consigue incrementar la capacidad portante del módulo, aunque no lo suficiente como para disponerse en la torres más solicitadas (Figura 3.8).

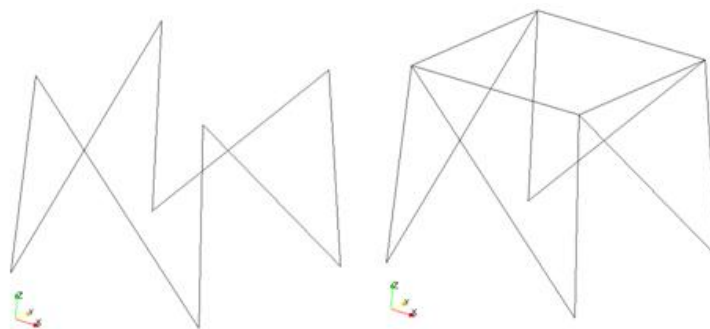


Figura 3.8: Bloques tipo Lambda (izquierda) y Súper Lambda (derecha).

- Tipo X: se trata de una geometría hexaédrica al igual que los bloques tipo lambda, consigue una mayor capacidad portante que los módulos anteriormente expuestos gracias a que el sistema de arriostramiento que incorpora se basa en cruces de San Andrés. Se compone de 2 materiales distribuidos en 12 elementos que conectan los 8 nodos situados en las esquinas del cubo (Figura 3.9).
- Tipo Súper X: corresponde con la evolución inmediata de la geometría tipo X para incrementar su capacidad portante, puesto que incorpora un arriostramiento adicional

sobre los 4 nodos superiores del bloque. Se compone de un total de 16 elementos con 3 materiales diferentes que comunican los 8 nodos que lo componen (Figura 3.9).

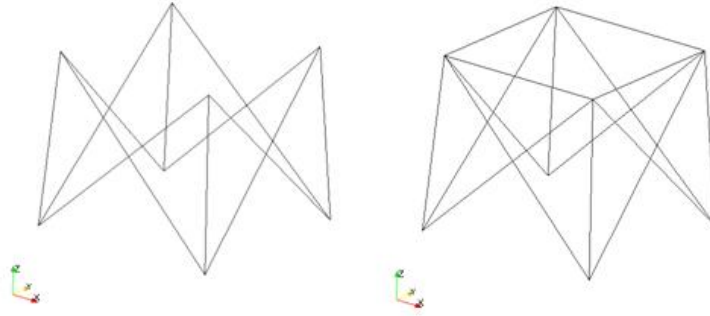


Figura 3.9: Bloques tipo X (izquierda) y Súper X (derecha).

- Tipo X Arriostrado y Súper X Arriostrado: en los casos en los que la solicitud del módulo es muy elevada, los bloques anteriores pierden su validez. En este caso resulta necesario incorporar sistemas de arriostramiento con barras de tipo redundante que permitan incrementar la capacidad estructural de los elementos que componen el módulo. En el primero de los casos se trata de una geometría configurada a partir de 32 nodos conectados por 85 barras con 5 materiales diferentes. El segundo de los módulos, del mismo modo que en el caso de los bloques Super X y Super Lambda, incorpora únicamente un arriostramiento de los cuatro nodos superiores formado por 4 barras de idéntico material. (Figura 3.10).

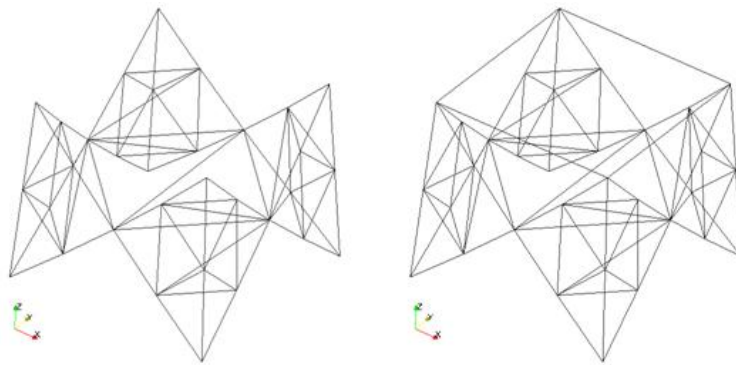


Figura 3.10: Bloques tipo X Arriostrado (izquierda) y Súper X Arriostrado (derecha).

3.3.3. Crucetas

Las crucetas son los módulos intermedios de la estructura sobre los que descansan los conductores principales de los circuitos concurrentes en la torre. En la investigación llevada a cabo en la presente tesis se han considerado los siguientes tipos de crucetas:

- **Cruceta Lateral:** se compone de un total de 13 nodos conectados a través de 32 barras con 6 tipos de secciones diferentes. Este tipo de módulos se disponen habitualmente en torres de alta tensión de simple circuito, o bien como módulos adicionales en estructuras especiales. Se caracteriza por las dimensiones de sus bases, su altura y la distancia al punto de amarre del conductor o ala (Figura 3.11).

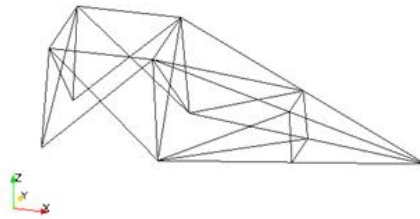


Figura 3.11: Cruceta tipo Lateral.

- **Cruceta Corta:** se genera a partir de 26 nodos comunicados por 72 barras con 6 tipos de secciones diferentes. Al igual que en el caso anterior se caracteriza por las dimensiones de sus bases, su altura y la longitud de las alas. Habitualmente se dispone sobre torres de doble o cuádruple circuito, permitiendo el amarre de dos cables conductores (Figura 3.12).

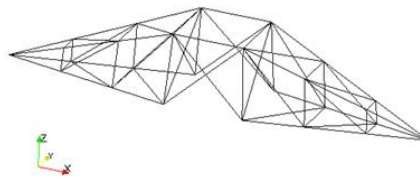


Figura 3.12: Cruceta Corta.

- **Cruceta Larga:** consiste en una versión del módulo anterior que permite alcanzar mayores longitudes de ala. Se dispone en torres de doble circuito de alto voltaje como cruceta intermedia, así como en torres de cuádruple circuito como cruceta inferior. Permite el amarre de hasta cinco conductores, y se genera a partir de una configuración

de 34 nodos conectados por 96 barras de 6 materiales diferentes. Del mismo modo que en los casos anteriores se caracteriza por las dimensiones de sus bases, su altura y la longitud de sus alas. (Figura 3.13).

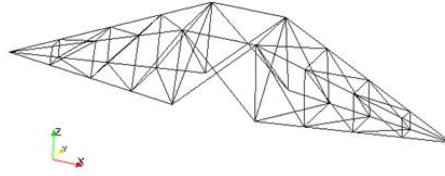


Figura 3.13: Cruceta Larga.

3.3.4. Cúpulas

La cúpula es el módulo superior y más elevado de las torres. Estructuralmente soportan el tense de los cables de guarda, que entre otras funciones permiten generar un paraguas de protección frente a sobretensiones de carácter natural. En la presente tesis se han considerado los siguientes bloques tipo cúpula (Figura 3.14):

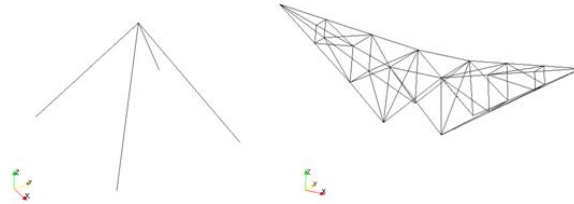


Figura 3.14: Cúpula tipo Simple (izquierda) y Cúpula tipo Doble (derecha).

- Cúpula Simple: compuesta por un total de 5 nodos y 4 elementos formados por el mismo tipo de sección, permite el apoyo de un único cable de guarda. Se dispone en aquellas torres en las que la distancia existente entre conductores no exige un paraguas de protección amplio. Se caracteriza por su altura y por las dimensiones de sus bases.
- Cúpula Doble: se compone a partir de una combinación de 72 elementos repartidos en 26 nodos con 6 tipos de secciones diferentes. Permite el apoyo de dos cables de guarda, por lo que el paraguas de protección que genera es sensiblemente más amplio. Se define tanto por las dimensiones de las bases superior e inferior, como por la longitud de sus alas y la altura de los puntos de amarre.

3.4. Acciones estructurales a considerar

Las cargas actuantes sobre la estructura se pueden clasificar en dos grandes categorías:

- Cargas Permanentes: son aquellas que actúan durante toda su vida útil manteniéndose constantes en magnitud, posición y dirección. Dentro de este grupo se engloban el peso propio de la estructura, los conductores que confluyen sobre la misma, las cadenas de aisladores y demás herrajes o equipamiento auxiliar acoplado a la torre.
- Cargas Variables: son aquellas que pueden actuar o no sobre la estructura. Dentro de este grupo se incluyen las acciones climáticas de viento o hielo.

A continuación se estudia en profundidad cada una de las cargas actuantes identificando su tratamiento en el modelo, así como valores de referencia a considerar, para un caso de apoyo en alineación. En este sentido, en el caso de que el apoyo no corresponda a una alineación pura, y se sitúe sobre un ángulo del trazado, se deberán componer convenientemente los valores de las cargas actuantes.

3.4.1. Peso Propio del Conductor

Las cargas derivadas del peso propio de los conductores se definen a través de la porción de cable cuyo peso descansa sobre el apoyo. Este concepto se define como gravivano y depende tanto de la longitud y los parámetros de catenaria de los vanos confluyentes, como del desnivel existente entre los puntos de fijación de los cables (Figura 3.15).

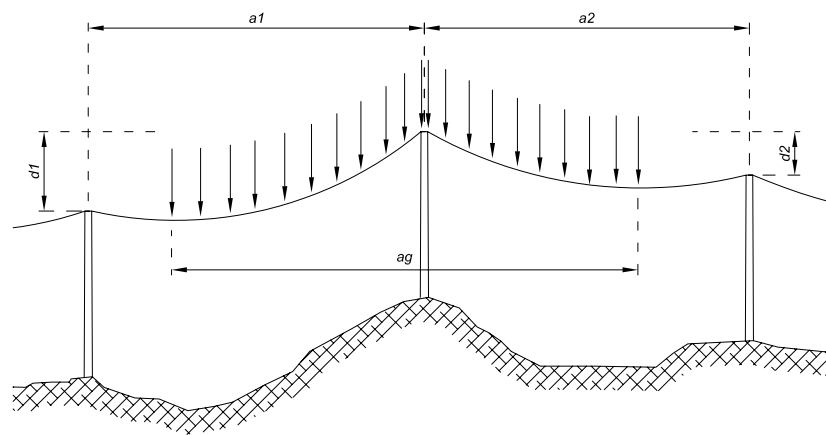


Figura 3.15: Esquema para la obtención del gravivano de un apoyo genérico en el que confluyen dos vanos diferentes.

En este sentido el gravivano para un apoyo genérico se puede obtener a partir de la expresión siguiente:

$$a_g = \frac{a_1 + a_2}{2} + h_1 \frac{d_1}{a_1} - h_2 \frac{d_2}{a_2} \quad (3.1)$$

donde h_1 y h_2 son los parámetros de la catenaria de los vanos confluyentes en la estructura, a_1 y a_2 su longitud, y d_1 y d_2 el desnivel existente entre el apoyo analizado y sus contiguos.

3.4.2. Peso Propio de la Estructura

Otra de las cargas permanentes a tener en consideración es el peso propio de la estructura. Estas cargas se distribuyen uniformemente a lo largo de la longitud de cada una de las barras que componen la torre de alta tensión, y dependen únicamente de la sección de la barra y del peso específico del material que las compone. En el caso que nos ocupa el material empleado es el acero laminado estructural, que de acuerdo a lo prescrito en el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] corresponde con una categoría S 275, con un peso específico de $7,85 \text{ T/m}^3$ y un límite elástico mínimo de 275 N/mm^2 .

Aceptando modelos estructurales de nudos articulados, este tipo de solicitaciones se pueden asimilar a cargas nodales aplicadas en los extremos de cada barra. De este modo se reduce el análisis del conjunto global de la estructura a un problema de tracción - compresión, tal y como puede comprobarse a continuación (Figura 3.16).

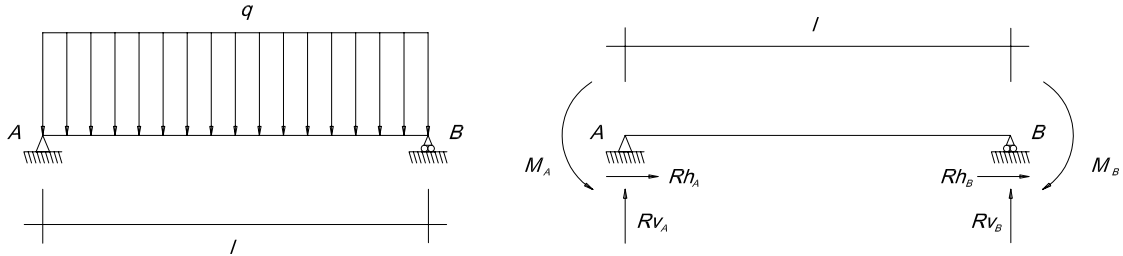


Figura 3.16: Esquema de la descomposición nodal de una carga distribuida sobre una barra biarticulada.

$$\left. \begin{aligned} \sum F_z &\Rightarrow R_{vA} + R_{vB} - qL = 0 \\ \sum F_x &\Rightarrow R_{hA} + R_{hB} = 0 \\ \sum M_A^{\circ} &\Rightarrow qL \frac{L}{2} - R_{vB}L - M_A = 0 \\ \sum M_B^{\circ} &\Rightarrow -qL \frac{L}{2} + R_{vA}L + M_B = 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} R_{hA} &= R_{hB} = 0 \\ R_{vA} &= R_{vB} = q \frac{L}{2} \\ M_A &= M_B = 0 \end{aligned} \right. \quad (3.2)$$

3.4.3. Peso Propio de los Herrajes y Aisladores

De acuerdo con el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] se consideran herrajes todos los elementos utilizados para la fijación de los aisladores al apoyo y al conductor, así como los elementos de fijación del cable de tierra al apoyo y los elementos de protección eléctrica de los aisladores.

Las cargas debidas al peso de accesorios suspendidos o acoplados se traducen en esfuerzos verticales aplicados en los nodos correspondientes. Entre los diferentes tipos de herrajes que pueden disponerse sobre una estructura de alta tensión se pueden distinguir:

- Aisladores: los conductores empleados en líneas aéreas, en la mayor parte de los casos, son desnudos; por lo tanto, se necesita aislarlos de los soportes por medio de aisladores fabricados generalmente de porcelana, vidrio o de materiales poliméricos (Figuras 3.17 y 3.18).

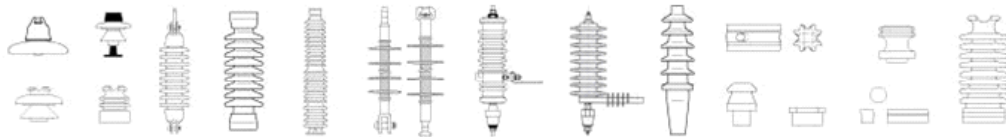


Figura 3.17: Diferentes tipos de aisladores.

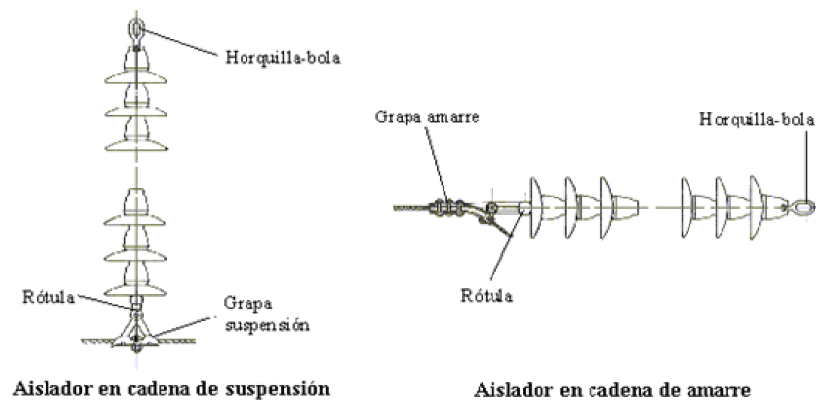


Figura 3.18: Disposición de aisladores tipo caperuza en cadenas de amarre y suspensión.

- Contrapesos: son aquellos pesos adicionales dispuestos bajo las cadenas de aislación para reequilibrar el apoyo en alineaciones fuertemente descompensadas o traccionadas verticalmente (apoyo ahorcado).
- Amortiguadores: son los dispositivos colocados para mitigar los fenómenos vibratorios

que el viento puede llegar a generar sobre los conductores. Estos elementos permiten absorber las vibraciones, reduciendo el daño sobre los conductores y el riesgo de colapso por agotamiento seccional debido a la fatiga de los cables.

- Otros herrajes: otro tipo de elementos con funciones muy variadas también pueden disponerse sobre los apoyos. Estos elementos permiten desde la propia fijación de los conductores, como es el caso de las grapas de amarre, hasta la instalación de equipamiento auxiliar en la línea, como es el caso de las antenas de telecomunicaciones.

3.4.4. Hielo

El tratamiento de las cargas de hielo en las líneas de alta tensión se realiza únicamente a través de las consecuencias que genera sobre los conductores de la línea. Esto se debe a la disposición de la torre de alta tensión como una estructura diáfana de barras metálicas en la que no existen paneles horizontales o subhorizontales que permitan una acumulación de nieve considerable sobre la estructura.

Es por ello que el único efecto estructural apreciable derivado de los efectos climáticos de las bajas temperaturas reside en la congelación de la humedad circundante al cableado, que se define como manguito de hielo (Figura 3.19).

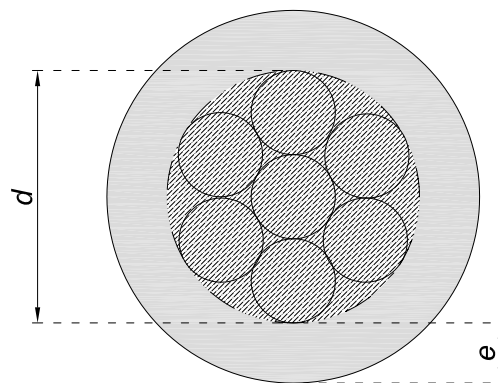


Figura 3.19: Esquema del manguito de hielo (e) en los conductores.

El Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59], establece tres diferentes zonas de exposición a efectos de hielo:

- Zona A: Es la situada a menos de 500 m de altitud sobre el nivel del mar. En esta zona se desprecia el efecto de la sobrecarga motivada por el manguito de hielo.
- Zona B: Abarca los lugares comprendidos entre 500 y 1000 m de altitud sobre el nivel del mar. En este caso, considerando un conducto o cable de tierra con un diámetro d

en milímetros, la sobrecarga debida al manguito de hielo p_h en daN viene dada por la siguiente expresión:

$$p_h = 0.18 \sqrt{d} \quad (3.3)$$

donde

- Zona C: Es la situada a una altitud superior a los 1000 m sobre el nivel del mar. En este caso la sobrecarga por manguito de hielo en daN se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$p_h = 0.36 \sqrt{d} \quad (3.4)$$

Para altitudes superiores a los 1500 metros es práctica habitual considerar una variación lineal del espesor del manguito de hielo, tal y como puede observarse en la Figura 3.20.

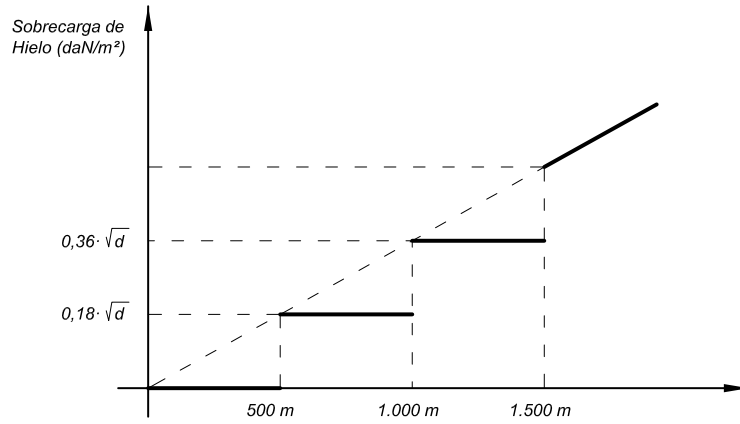


Figura 3.20: Diagrama de sobrecarga de hielo en función de la altitud de la zona.

Con todo ello una vez obtenida la sobrecarga de hielo se puede obtener directamente el espesor del manguito de hielo que la provoca. Para ello se iguala la sobrecarga de hielo con el peso específico de una sección de referencia de manguito de hielo sobre una porción unitaria de conductor. Así, para apoyos situados en la Zona B el espesor se obtiene como:

$$p_h = S \gamma \Rightarrow 0.18 \cdot 10^{-3} \sqrt{d} = \left[\pi (r + e)^2 - \pi r^2 \right] \gamma \quad (3.5)$$

$$e^2 + 2 r e - \frac{0.18 \cdot 10^{-3} \sqrt{d}}{\pi \gamma} = 0 \quad (3.6)$$

$$e = -r + \sqrt{r^2 + \frac{240 \sqrt{2} r}{\pi}} \quad (3.7)$$

Del mismo modo se calcula el espesor del manguito de hielo para apoyos situados Zona C:

$$p_h = S \gamma \Rightarrow 0.36 \cdot 10^{-3} \sqrt{d} = \left[\pi (r + e)^2 - \pi r^2 \right] \gamma \quad (3.8)$$

$$e^2 + 2 r e - \frac{0.36 \cdot 10^{-3} \sqrt{d}}{\pi \gamma} = 0 \quad (3.9)$$

$$e = -r + \sqrt{r^2 + \frac{480 \sqrt{2} r}{\pi}} \quad (3.10)$$

Estos valores tienen utilidad de cara a la combinación de acciones de hielo más viento, puesto que el espesor del manguito de hielo condiciona la magnitud de la silueta de conductor sobre la que actúa la presión del viento. Este hecho se tratará con mayor profundidad en el siguiente apartado.

3.4.5. Viento

Las acciones derivadas de los efectos climáticos del viento sobre las torres de transporte de energía se traducen en tres tipos de acciones:

- Acciones sobre los apoyos en celosía.
- Acciones sobre los conductores.
- Acciones sobre las cadenas de aisladores.

En cuanto a las acciones sobre los apoyos, tal y como define el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico de Seguridad Estructural: Acciones [60], la distribución y el valor de las presiones que ejerce el viento sobre un edificio dependen de la forma y las dimensiones de la construcción, de las características y la permeabilidad de su superficie, así como de la dirección, la intensidad y el racheo del viento.

No obstante el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] recoge una simplificación válida para el cálculo directo de la magnitud de este tipo de sobrecargas. Este método se obtiene a partir del estudio particular del comportamiento de las estructuras de transporte de energía en España y viene dado por la siguiente expresión:

$$q = 170 \left(\frac{V_v}{120} \right)^2, \quad (3.11)$$

donde q es la presión del viento sobre la estructura en daN/m^2 , y V_v la velocidad de referencia que define la norma para el cálculo expresada en km/h . El reglamento considera una velocidad mínima de referencia de 120 km/h ($33,33 \text{ m/s}$), excepto en líneas de categoría especial, en las que se prescribe una velocidad mínima de referencia de 140 km/h ($38,89 \text{ m/s}$). No obstante el proyectista podrá asumir, bajo su criterio, valores diferentes a los prescritos por la norma, siempre y cuando se justifiquen convenientemente.

Esta formulación se obtiene siguiendo el Manual 52 de la ASCE [5], donde la superficie del viento sobre superficies planas equivale a:

$$q = 0.0042 V^2 \text{ lb/ft}^2 = 0.007921 V^2 \text{ daN/m}^2 \quad (3.12)$$

Si se considera que el 100 % viento está aplicado sobre la cara en la que incide y un 50 % sobre la cara opuesta, resulta el valor prescrito por la normativa española:

$$q = 7.921 \cdot 10^{-3} (120)^2 \cdot 1.50 = 171.094 \text{ daN/m}^2 \quad (3.13)$$

Se puede observar como con la expresión 3.11 se obtiene un valor prácticamente idéntico al anterior, considerando la velocidad de referencia exigida por la norma (120 km/h). Del mismo modo el Reglamento prescribe la horizontalidad de la carga de viento, que se aplica siempre en dirección perpendicular a la superficie o cara de la torre sobre la que actúe. En este sentido es importante reseñar que la formulación prescrita incluye no sólo el efecto de la presión sobre la cara a barlovento sino también el efecto de succión sobre la cara a sotavento. En este sentido el antiguo RLAT de 1968 [58] establecía las siguientes expresiones en función de la situación de la cara de la estructura en relación con la dirección del viento:

$$\begin{aligned} 160 (1 - \eta), & \text{ para las caras a barlovento y} \\ 80 (1 - \eta), & \text{ para las caras a sotavento,} \end{aligned} \quad (3.14)$$

siendo η un coeficiente de opacidad adimensional que toma un valor de 0.50. Así, la presión total sobre la superficie definida por la silueta del apoyo es:

$$160 (1 - 0.50) + 80 (1 - \eta) = 120 \text{ daN/m}^2 \quad (3.15)$$

Dado que la velocidad mínima de referencia prescrita por la norma actual vigente en España es de 120 km/h , la presión mínima ejercida por el viento sobre la estructura equivale a 170 daN/m^2 , valor superior al definido en la antigua normativa.

En lo referente a la acción del viento sobre los conductores, la presión causa fuerzas transversales a la dirección de la línea, al mismo tiempo que aumenta las tensiones sobre los conductores.

Su tratamiento analítico se lleva a cabo a través de la porción de cableado que transmite el viento sobre el apoyo analizado, concepto que se conoce como eolovano (a_e). Este término es conceptualmente similar al del gravivano empleado para el cálculo del peso del conductor, pero con ciertas diferencias derivadas de la naturaleza intrínseca de la carga. En el caso del peso propio la porción de conductor que descansa sobre un apoyo es el comprendido entre los puntos mínimos de las catenarias confluyentes sobre la estructura. Este hecho se debe a que la geometría del cable en el plano de actuación de la carga genera en dichos puntos un cambio de signo en su curvatura.

Sin embargo en el caso del viento la porción de cable corresponde directamente con la mitad de cada uno de los vanos concurrentes. Ello es debido a que la geometría del conductor en el plano sobre el que actúa la carga de viento presenta una curvatura muy leve y que desde el punto de vista del cálculo no se considera. De este modo el reparto de cargas es directo sobre los apoyos extremos de cada vano (Figura 3.21).

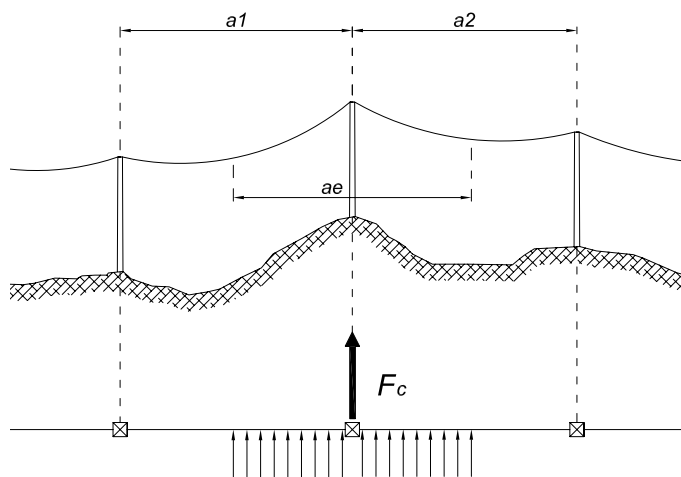


Figura 3.21: Esquema de las fuerzas horizontales generadas por el viento sobre los conductores (eolovano).

Con todo ello el Reglamento define la fuerza del viento sobre el haz de conductores como:

$$F_c = q d a_e = q d \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (3.16)$$

donde d representa el diámetro del conductor [m] y q la presión ejercida por la carga de viento [daN/m²], que se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

$$q = 60 \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \text{ para conductores con } d \leq 16 \text{ mm} \quad (3.17)$$

$$q = 50 \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \text{ para conductores con } d > 16 \text{ mm} \quad (3.18)$$

En el caso de cargas combinadas de hielo y viento se deberá considerar el diámetro del conductor incluido el espesor del manguito de hielo, para la obtención de la silueta efectiva. Con ello la expresión de la fuerza total de viento será:

$$F_c = q (d + 2e) \frac{a_1 + a_2}{2} \quad (3.19)$$

Del mismo modo hay que reseñar que a pesar de que la naturaleza de la fuerza de viento supone que la presión sea únicamente ejercida sobre la silueta de los conductores, en el caso de disposiciones de varios cables por fase (dúplex, tríplex, etc...) la fuerza total de viento se considerará como la suma de las fuerzas sobre cada uno de los conductores que compongan la fase. Este hecho supone un factor de seguridad adicional sobre la estructura a la hora de obtener los resultados.

Finalmente el viento también ejerce una presión horizontal [daN/m²] sobre las cadenas de aislamiento directamente proporcional a su silueta que se obtiene como:

$$q = 70 \left(\frac{V_v}{120} \right)^2 \quad (3.20)$$

3.4.6. Tense de los Conductores

El tense de los conductores representa la carga transmitida por el cableado a la estructura derivada del tendido de las fases. Este tipo de cargas son de carácter puntual y se transmiten sobre los apoyos cuya cadena de aisladores es de tipo amarre, anclaje o fin de línea; ya que los apoyos en suspensión están diseñados como puntos intermedios para elevar el cable y no como puntos fuertes de la línea que transmitan el tense a la cimentación (Figura 3.22).

Este tipo de carga es la responsable directa de la geometría y la flecha entre apoyos que genera el conductor en la línea. De este modo la ecuación general de equilibrio de un hilo apoyado entre dos puntos A y B es la definida por la expresión de la catenaria:

$$y = h \cdot \cosh \left(\frac{x}{h} \right) \quad (3.21)$$

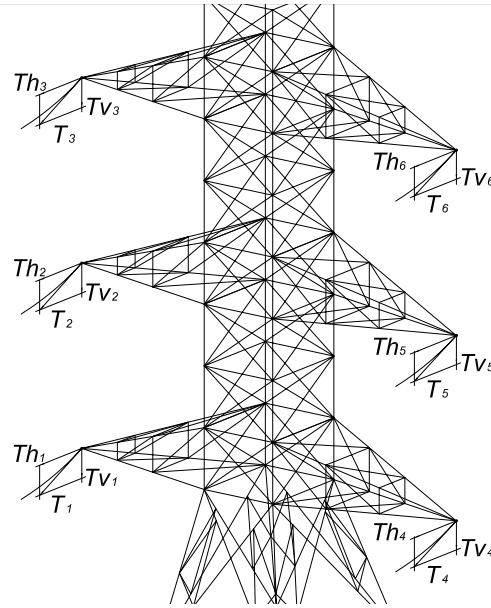


Figura 3.22: Distribución de los tenses de los conductores sobre una torre de doble circuito.

donde h es el parámetro fundamental de la catenaria y se obtiene a partir de la relación entre la componente horizontal de la tensión del conductor T_0 y el peso del conductor por unidad de longitud p en las condiciones correspondientes (Figura 3.23).

$$h = \frac{T_0}{p} \quad (3.22)$$

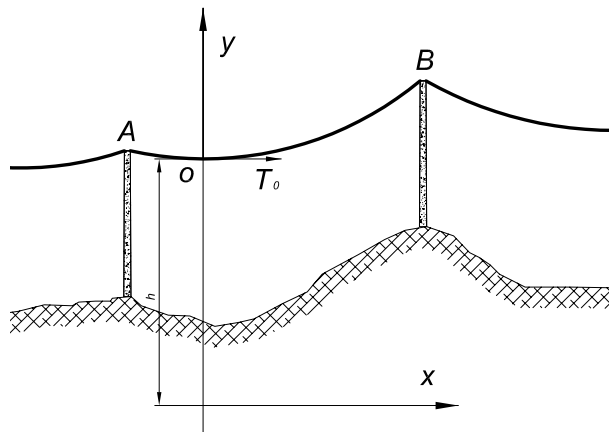


Figura 3.23: Esquema de geometría y parámetros de catenaria.

3.5. Combinaciones o Estados de Carga

Una vez definidas las diferentes cargas actuantes sobre el modelo estructural de torre de alta tensión, se expondrán los diferentes estados de carga o combinaciones a los que hay que someter a la estructura para verificar su viabilidad. De este modo la normativa vigente en España establece a través del Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] el estudio de 4 casos de carga diferentes:

- Primera Hipótesis: Viento.
- Segunda Hipótesis: Hielo.
- Tercera Hipótesis: Desequilibrio de tracciones.
- Cuarta Hipótesis: Rotura de conductor.

En función de la naturaleza o tipo de apoyo analizado los estados de carga se clasifican en relación a la probabilidad de desarrollarse efectivamente sobre la estructura. En este sentido se distinguen dos categorías: hipótesis normales y anormales, tal y como puede comprobarse en la tabla 3.4 expuesta por Moreno y Garnacho [61].

Tipo de Apoyo	Hipótesis Normales	Hipótesis Anormales
Alineación	1 ^a y 2 ^a	3 ^a y 4 ^a
Ángulo	1 ^a y 2 ^a	3 ^a y 4 ^a
Anclaje	1 ^a y 2 ^a	3 ^a y 4 ^a
Fin de Línea	1 ^a y 2 ^a	4 ^a

Tabla 3.4: Hipótesis de cálculo según el tipo de apoyo.

En función de esta última consideración así como del material del que esté realizado el apoyo, el Reglamento [59] exige diferentes coeficientes de seguridad mínimos para la estructura. De acuerdo con el objetivo de la presente tesis, dado que se analizan estructuras metálicas de transporte de energía, los coeficientes de seguridad de referencia serán:

- 1.50 para hipótesis normales.
- 1.20 para hipótesis anormales.

3.5.1. Primer Caso de Carga: Viento

Como primera hipótesis de cálculo se estudia el comportamiento de la estructura frente a una situación de fuertes vientos tanto sobre los conductores y cables de tierra como sobre

los apoyos y herrajes. Tal y como se expuso en el epígrafe anterior, esta situación queda definida de acuerdo con la velocidad del viento de proyecto. En este sentido y de acuerdo a la categoría de la línea se empleará: 120 km/h para las líneas de categoría normal y 140 km/h para las líneas de categoría especial.

Es importante reseñar que la causa más común del fallo estructural de este tipo de torres se debe precisamente a causas climáticas, las que por su variabilidad son más difíciles de predecir. Es por ello que a pesar de su aleatoriedad, son consideradas como hipótesis normales de trabajo, exigiéndose los coeficientes de seguridad más elevados.

3.5.2. Segundo Caso de Carga: Hielo

Esta hipótesis de carga es aplicable únicamente para las estructuras de alta tensión que queden dentro de las zonas climáticas B o C, o lo que es lo mismo, que se encuentren a una altura superior a los 500 m sobre el nivel del mar. Este hecho se debe a que por debajo de dicha altitud no se genera un manguito de hielo suficiente sobre los conductores como para transmitir cargas significativas a la estructura.

Dado que la situación de frío extremo se encuentra comúnmente ligada a fenómenos climatológicos adversos tales como tormentas o vendavales, el Reglamento de Líneas [59] estudia la respuesta de la estructura frente a una solicitación combinada del manguito de hielo con la acción de viento para una velocidad mínima de 60 km/h. En este sentido el manguito de hielo aumenta la silueta expuesta a la presión del viento, de forma que la carga de viento deberá afectar al diámetro del conductor aumentado en dos veces el espesor del manguito de hielo, tal y como se expuso en el epígrafe 3.4.4.

3.5.3. Tercer Caso de Carga: Desequilibrio de Tracciones

Con la tercera hipótesis el Reglamento de Líneas Español [59] pretende verificar la viabilidad estructural de las torres de alta tensión frente a posibles desequilibrios entre los tenses de los conductores confluyentes sobre la estructura. Este tipo de desequilibrios pueden ser consecuencia del desgaste de las fijaciones por el paso del tiempo, fenómenos climáticos de dilatación o contracción diferencial de los conductores, concentración de cargas en los vanos u operaciones de mantenimiento y conservación, entre otras.

En resumen, este caso de carga es el resultado de situaciones indeseables en la línea o bien de situaciones puntuales cuya probabilidad de suceso es muy baja. Es por ello que esta hipótesis se categoriza como anormal y, por tanto, los coeficientes de seguridad mínimos exigidos son inferiores a los de las hipótesis de carga normales.

Del mismo modo el Reglamento [59] considera diferentes grados de desequilibrio de

acuerdo a los tipos de apoyo analizado y de cadena de aislación, así como a la tensión de servicio de la línea que soporta (Tabla 3.5).

Tipo de Apoyo	Tipo de Cadena de Aisladores	Tensión de Servicio	Desequilibrio
Alineación y Ángulo	Suspensión	$> 66 \text{ KV}$	15 %
Alineación y Ángulo	Suspensión	$\leq 66 \text{ KV}$	8 %
Alineación y Ángulo	Amarre	$> 66 \text{ KV}$	25 %
Alineación y Ángulo	Amarre	$\leq 66 \text{ KV}$	15 %
Anclaje	Amarre	—	50 %
Fin de Línea	Amarre	—	100 %

Tabla 3.5: Grado de desequilibrio a aplicar en función de la tipología de apoyo, de la cadena de amarre, y de la tensión de servicio [59].

En apoyos especiales o apoyos sujetos a fuertes desequilibrios, como por ejemplo un apoyo de amarre con una diferencia notable en la longitud de los vanos contiguos, deberá realizarse un estudio pormenorizado con el objetivo de evaluar las condiciones más desfavorables de la estructura.

3.5.4. Cuarto Caso de Carga: Rotura de Conductores

La cuarta hipótesis analiza el caso de carga accidental por excelencia en las estructuras de transporte de energía. La rotura de los conductores es una situación excepcional que puede venir motivada por una gran variedad causas, que abarcan desde sobretensiones en la línea hasta la caída de objetos sobre el cableado.

Estrictamente, el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] exige considerar la rotura de los conductores de una sola fase o cable de tierra por apoyo, independientemente del número de circuitos o cables de tierra instalados en él. No obstante en el caso de apoyos de alineación y ángulo con más de un conductor por cable, el citado reglamento [59] contempla la necesidad de considerar un porcentaje de desequilibrio sobre el resto de los cables que componen el haz afectado por la rotura (Figura 3.24). Tal y como exponen Moreno y Garnacho en sus comentarios al Reglamento de Líneas de Alta Tensión [61], se aplicarán los coeficientes de desequilibrio de la Tabla 3.6.

En el caso de los apoyos en amarre y fin de línea, se considerará el esfuerzo correspondiente a la rotura de un cable de tierra o de un conductor sin reducción alguna de su tensión. De este modo y a diferencia de los apoyos de alineación y ángulo, en líneas de conductores de haces múltiples se considerará la rotura de un cable de tierra o bien la rotura total de los conductores del haz de fase. En este caso se supondrá una tensión mecánica sobre el resto

Tipo de Apoyo	Tipo de Cadena de Aisladores	Número de conductores por fase	Desequilibrio
Alineación y Ángulo	Suspensión	1	50 %
Alineación y Ángulo	Suspensión	2	50 %
Alineación y Ángulo	Suspensión	3	75 %
Alineación y Ángulo	Suspensión	≤ 4	100 %
Alineación y Ángulo	Amarre	1	100 %
Alineación y Ángulo	Amarre	≤ 2	50 %

Tabla 3.6: Grado de desequilibrio a aplicar en función de la tipología de apoyo, de la cadena de amarre, y de la tensión de servicio [61].

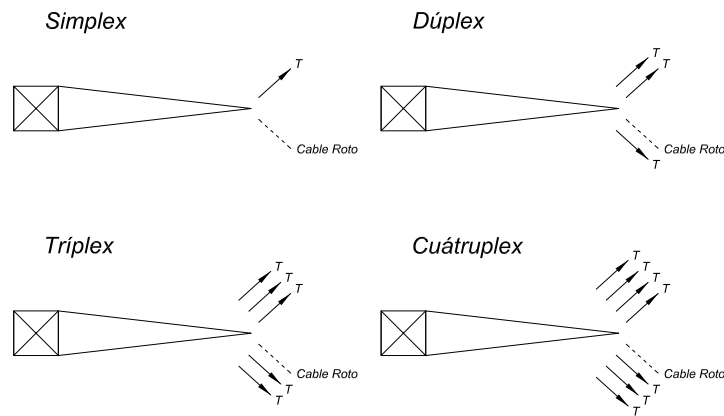


Figura 3.24: Esquema de fuerzas para la cuarta hipótesis de carga en apoyos de ángulo y alineación según el número de cables por fase [61].

de los cables del haz, igual al 50 % de la que les corresponde para el caso de los apoyos de anclaje y del 100 % para los apoyos de fin de línea (Figuras 3.25 y 3.26).

Este tipo de esfuerzos se considerarán aplicados en el punto donde produzcan la sollicitación más desfavorable sobre la estructura.

3.6. Esquema Numérico Empleado

Una vez expuesto el modelo estructural considerado así como las cargas actuantes y sus combinaciones se puede encarar el esquema numérico implementado para la resolución del problema estructural. En consonancia con todo lo anterior y resumiendo los aspectos

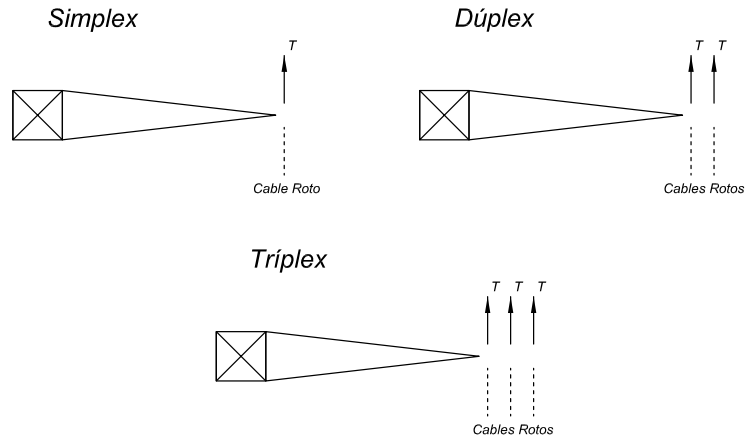


Figura 3.25: Esquema de fuerzas para la cuarta hipótesis de carga en apoyos de amarre según el número de cables por fase [61].

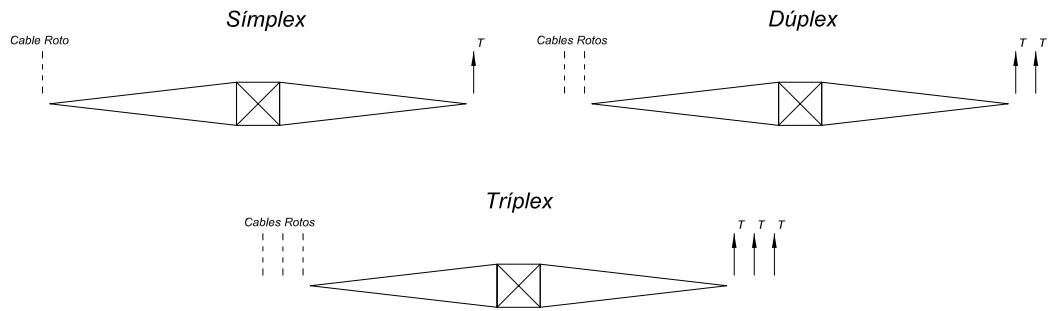


Figura 3.26: Esquema de fuerzas para la cuarta hipótesis de carga en apoyos de fin de línea según el número de cables por fase [61].

más relevantes expuestos a lo largo del capítulo, en la presente tesis se plantea un modelo de nudos articulados basado en cargas puntuales aplicadas sobre los nodos de la estructura (Figura 3.27). De este modo para su resolución se plantea un modelo de elementos finitos tipo barra que se ajusta a la geometría de la torre analizada.

Así, planteando el equilibrio de fuerzas en los nodos de la estructura se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

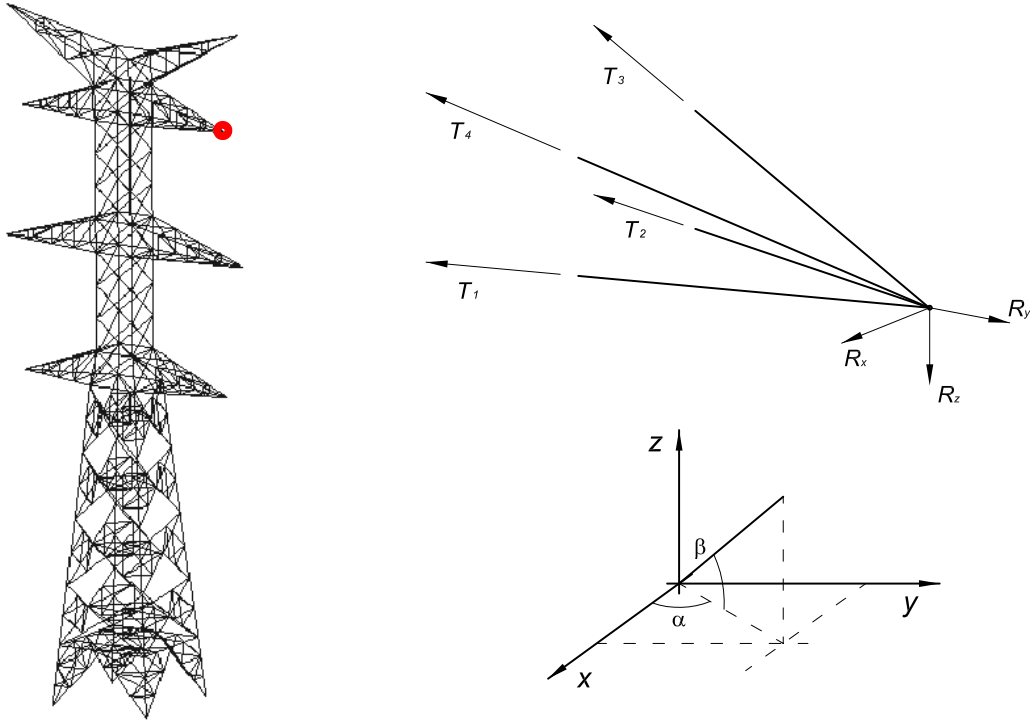


Figura 3.27: Esquema Resistente de una estructura de nudos articulados, sometida a cargas aplicadas sobre los nodos.

$$\left. \begin{aligned} \sum F_x &\Rightarrow \sum_{i=1}^n T_i \cos(\beta_i) \cos(\alpha_i) = R_x \\ \sum F_y &\Rightarrow \sum_{i=1}^n T_i \cos(\beta_i) \sin(\alpha_i) = R_y \\ \sum F_z &\Rightarrow \sum_{i=1}^n T_i \sin(\beta_i) = R_z \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

De este modo, se considera la flexión a nivel local del elemento, pero dado que se trata de estructuras metálicas de barras, y que por tanto están compuestas por piezas de gran esbeltez, los fenómenos compresivos serán más restrictivos, debido al posible desarrollo de inestabilidades de pandeo. Además y tal y como se expuso en el epígrafe 3.2.3, las únicas cargas aplicadas sobre la estructura capaces de generar flexión a nivel elemental no son lo suficientemente elevadas como para provocar flexiones que comprometan la estructura a nivel local.

Con todo, la aplicación del método de los elementos finitos permite la obtención de los esfuerzos elementales en la estructura a través de la relación existente entre los des-

plazamientos y las fuerzas exteriores que lo generan. Para ello se parte de las siguientes hipótesis:

- El funcionamiento de la estructura sigue un modelo de tracción-compresión.
- Los materiales que componen la estructura son perfectamente elásticos o bien incapaces de sobrepasar su límite elástico.

Esta última hipótesis posibilita el empleo de la Ley de Hooke como ecuación constitutiva del problema (Figura 3.28), permitiendo relacionar la deformación sufrida por un elemento con los esfuerzos elementales que la provocan, a través de la siguiente expresión:

$$\left. \begin{aligned} \sum \sigma_e &= \{N_e\} \\ \sum N_e &= \left(\frac{E A_e}{l_e} \right) \Delta l_e \end{aligned} \right\} \Rightarrow \sigma_e = D_e \epsilon_e \equiv \text{ECUACIÓN CONSTITUTIVA} \quad (3.24)$$

donde $D_e = [(E A_e) / l_e]$ es la matriz de rigidez elemental en ejes locales.

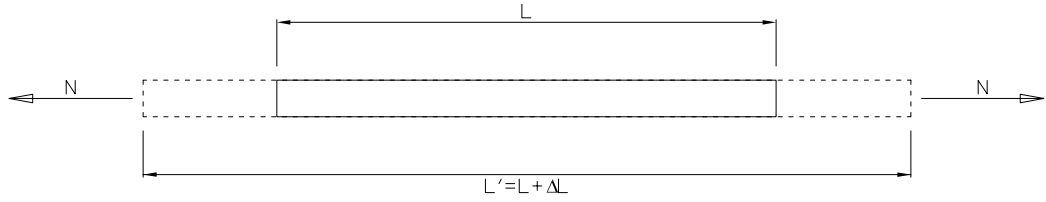


Figura 3.28: Esquema deformacional de una barra o elemento sometido a tracción.

Por otro lado, puede relacionarse la deformación elemental con los desplazamientos nodales a través de la ecuación de compatibilidad. En el caso que nos ocupa esta ecuación consiste en un cambio de sistema de referencia de los ejes locales del elemento a los ejes globales que rigen el problema estructural. Para la obtención de la expresión que rige la ecuación de compatibilidad del problema planteado en la presente tesis se ha seguido la siguiente nomenclatura:

$\mathbf{u}'_{i,e} = \begin{pmatrix} u'_{i,e} \\ v'_{i,e} \\ w'_{i,e} \end{pmatrix}$ representa desplazamiento del nodo i , del elemento e , en ejes locales.

$\mathbf{u}'_e = \begin{pmatrix} \mathbf{u}'_{1,e} \\ \mathbf{u}'_{2,e} \end{pmatrix}$ corresponde con el vector de desplazamientos nodales del elemento e en ejes locales.

$\mathbf{u}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_{1,e} \\ \mathbf{u}_{2,e} \end{pmatrix}$ equivale al vector de desplazamientos nodales del elemento e en ejes globales.

$\epsilon_e = \{\Delta L_e\} = \{\mathbf{u}'_{2,e} - \mathbf{u}'_{1,e}\}$ define la variación de la longitud del elemento e .

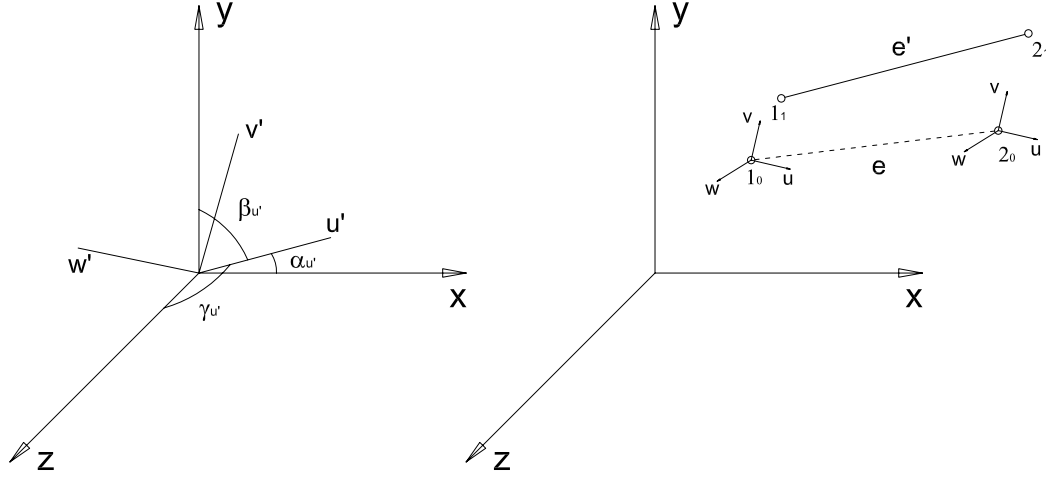


Figura 3.29: Ejes globales y locales de un elemento.

De este modo la expresión implementada para la ecuación de compatibilidad es la siguiente:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_e &= \mathbf{E}_e \mathbf{u}'_e \\ \mathbf{u}'_e &= \mathbf{T}_e \mathbf{u}_e \end{aligned} \right\} \Rightarrow \epsilon_e = \mathbf{E}_e (\mathbf{T}_e \mathbf{u}_e) \quad (3.25)$$

$$\epsilon_e = \mathbf{B}_e \mathbf{u}_e \equiv \text{ECUACIÓN DE COMPATIBILIDAD} \quad (3.26)$$

definiéndose la matriz de relación entre los desplazamientos y las deformaciones \mathbf{E}_e de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\mathbf{E}_e = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Por otro lado la matriz de cambio de base, \mathbf{T}_e viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_e & 0 \\ 0 & \mathbf{Q}_e \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{Q}_e = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{u'}) & \cos(\beta_{u'}) & \cos(\gamma_{u'}) \\ \cos(\alpha_{v'}) & \cos(\beta_{v'}) & \cos(\gamma_{v'}) \\ \cos(\alpha_{w'}) & \cos(\beta_{w'}) & \cos(\gamma_{w'}) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Finalmente la matriz de compatibilidad del problema, se forma a partir de los cosenos directores del elemento considerado, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$\mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_{u'}) & -\cos(\beta_{u'}) & -\cos(\gamma_{u'}) & \cos(\alpha_{u'}) & \cos(\beta_{u'}) & \cos(\gamma_{u'}) \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Por último y dado que los datos de entrada del problema son las fuerzas exteriores aplicadas en los nodos de la estructura, se puede generalizar la formulación introduciendo una última expresión que relacione las fuerzas aplicadas con los esfuerzos elementales que generan. Ello se consigue con las ecuaciones de equilibrio que, debido a la primera de las hipótesis anteriormente citadas, consiste en un nuevo cambio de sistema de referencia que obtiene a partir de las fuerzas exteriores, según el sistema global del problema, el esfuerzo axial que generan en cada uno de sus elementos.

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{f}'_e = \mathbf{E}_e^T \boldsymbol{\sigma}_e \\ \mathbf{f}_e = \mathbf{T}_e^T \mathbf{f}'_e \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{f}_e = \mathbf{T}_e^T (\mathbf{E}_e^T \boldsymbol{\sigma}_e) = \mathbf{B}_e^T \boldsymbol{\sigma}_e \equiv \text{ECUACIÓN DE EQUILIBRIO} \quad (3.30)$$

donde \mathbf{f}'_e el vector de fuerzas nodales del elemento e en ejes locales y \mathbf{f}_e su proyección en ejes globales (Figura 3.30), de acuerdo a las siguientes expresiones:

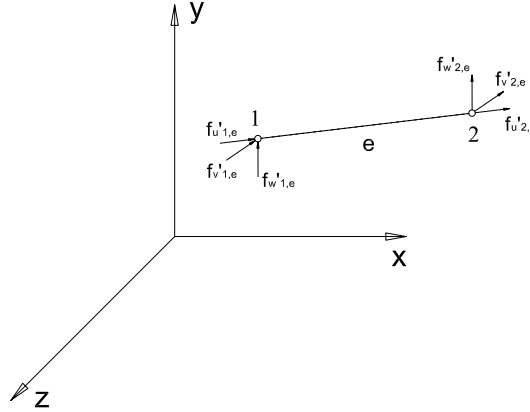


Figura 3.30: Fuerzas Nodales del elemento en ejes locales.

$$\mathbf{f}_e = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{1,e} \\ \mathbf{f}_{2,e} \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

$$\mathbf{f}'_e = \begin{pmatrix} \mathbf{f}'_{1,e} \\ \mathbf{f}'_{2,e} \end{pmatrix} \quad (3.32)$$

siendo $\mathbf{f}'_{i,e} = \begin{pmatrix} f'_{u,i,e} \\ f'_{v,i,e} \\ f'_{w,i,e} \end{pmatrix}$ la descomposición del vector de fuerzas del nodo i , del elemento e , en ejes locales.

Con todo ello, y combinando las tres expresiones anteriormente definidas, se obtiene la ecuación fundamental que rige el comportamiento estructural del problema.

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\epsilon}_e &= \mathbf{B}_e \mathbf{u}_e \\ \boldsymbol{\sigma}_e &= \mathbf{D}_e \boldsymbol{\epsilon}_e \\ \mathbf{f}_e &= \mathbf{B}_e^T \boldsymbol{\sigma}_e \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}_e &= \mathbf{D}_e (\mathbf{B}_e \mathbf{u}_e) = \mathbf{S}_e \mathbf{u}_e \\ \mathbf{f}_e &= (\mathbf{B}_e^T \mathbf{S}_e) \mathbf{u}_e = \mathbf{K}_e \mathbf{u}_e \end{aligned} \right. \quad (3.33)$$

$$\mathbf{K}_e \mathbf{u}_e = \mathbf{f}_e \equiv \text{ECUACIÓN ELEMENTAL} \quad (3.34)$$

De forma que \mathbf{K}_e es la matriz de rigidez elemental y \mathbf{f}_e el vector de fuerzas exteriores aplicadas en los nodos de la barra. Ambas entidades se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{B}_e^T \mathbf{D}_e \mathbf{B}_e \Rightarrow \mathbf{K}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{e,11} & \mathbf{K}_{e,12} \\ \mathbf{K}_{e,21} & \mathbf{K}_{e,22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & -\mathbf{K} \\ -\mathbf{K} & \mathbf{K} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$\mathbf{K} = \frac{E A_e}{l_e} \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha_u') & \cos(\alpha_u') \cos(\beta_u') & \cos(\alpha_u') \cos(\gamma_u') \\ \cos(\alpha_u') \cos(\beta_u') & \cos^2(\beta_u') & \cos(\beta_u') \cos(\gamma_u') \\ \cos(\alpha_u') \cos(\gamma_u') & \cos(\beta_u') \cos(\gamma_u') & \cos^2(\gamma_u') \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$\mathbf{f}_e = \begin{bmatrix} f_{1x,e} \\ f_{1y,e} \\ f_{1z,e} \\ f_{2x,e} \\ f_{2y,e} \\ f_{2z,e} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

De este modo, componiendo la matriz de rigidez de los diferentes elementos de la estructura se obtiene, la ecuación de equilibrio fundamental:

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \equiv \text{ECUACIÓN DE EQUILIBRIO FUNDAMENTAL} \quad (3.38)$$

Siendo \mathbf{K} y \mathbf{f} , la matriz de rigidez elemental y el vector de fuerzas nodales respectivamente. Una vez obtenida la ecuación fundamental del problema, que relaciona las fuerzas

exteriores aplicadas sobre la estructura con los desplazamientos nodales, resulta directa la obtención de los esfuerzos elementales de la estructura. En este sentido el modelo de análisis proporciona los esfuerzos axiles en cada una de las barras que componen la estructura.

De este modo la obtención de los esfuerzos puede reducirse a un mero problema de cambio de sistema de referencia de las fuerzas nodales. Es por ello que para obtener los esfuerzos axiles de las barras es necesario realizar una transformación del sistema global de coordenadas a los sistemas locales de cada uno de los elementos que componen la estructura (Figura 3.31).

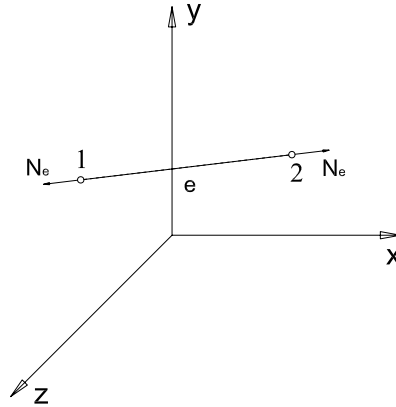


Figura 3.31: Axiles o esfuerzos elementales de la estructura.

Así, la citada transformación se obtiene aplicando las siguientes expresiones:

$$\sigma_e = \{N_e\}, \quad (3.39)$$

donde:

$$\sigma_e = B_e^{-T} f_e = B_e^{-T} K_e u_e \rightarrow \sigma_e = B_e^{-T} (B_e^T D_e B_e) u_e \quad (3.40)$$

$$\sigma_e = D_e (B_e u_e) = S_e u_e \quad (3.41)$$

3.7. Resumen

En el presente capítulo se ha expuesto exhaustivamente la formulación necesaria para la obtención de las cargas que solicitan las estructuras de transporte de energía, así como las combinaciones de carga exigidas por la normativa vigente. De acuerdo con la norma española este tipo de estructuras se solicitan por 4 tipos de carga diferentes:

- Peso propio del material.
- Viento sobre los conductores y apoyos.
- Hielo.
- Fuerza de Tendido de los conductores.

Existen otro tipo de acciones como es el caso de sismo, aludes o maremotos, que se escapan del análisis tradicional exigiendo estudios particularizados de las estructuras a disponer, y que quedan fuera del objeto de la presente tesis doctoral. Con todo ello, la legislación vigente requiere la combinación de las acciones estructurales anteriormente mencionadas de acuerdo a 4 grandes hipótesis de carga:

- Viento: en la que se evalúa la respuesta de la estructura frente a la solicitación del viento sobre la estructura, el cableado y los herrajes que los componen.
- Hielo: en la que se verifica la respuesta estructural de la torre frente a la sobrecarga que el hielo genera en los conductores.
- Desequilibrio de tracciones: en la que se evalúa el comportamiento de la estructura frente a tareas de mantenimiento y operación que exijan el destensado de uno de los vanos que confluyen en la estructura.
- Rotura de conductor: en la que se analiza el comportamiento de la estructura frente a situaciones accidentales en las que se produzca la rotura de uno o más conductores.

De este modo, la resolución del problema estructural planteado en la presente tesis doctoral se encara a través de un análisis estático tradicional de un modelo tridimensional de barras articuladas. Dicho modelo se basa en una geometría compuesta por elementos finitos tipo barra que simula por completo la estructura. En este sentido se asumirá que las cargas exteriores que solicitan la torre no suponen flexiones relevantes en los elementos, siendo inferiores al 10 % de la carga de rotura del material. Dado que la metodología de optimización puede llegar a ajustar el comportamiento estructural al límite, se aceptará en el cálculo que las secciones se mantengan por debajo de su límite elástico, obviando la contribución de la flexión sobre la estructura y reduciendo el problema estructural a un análisis de tracción compresión. Este tipo de tratamiento elástico seccional, en virtud de no considerar la flexión en la estructura, coincide con los modelos de cálculo empleados tradicionalmente, tal y como se definió en el capítulo anterior.

En el siguiente capítulo se analizará en profundidad el tratamiento del problema de optimización, estudiando tanto las restricciones como la función de energía y realizando una breve recapitulación de los principales métodos de optimización empleados en la actualidad.

“Cada curva matemática tiene una naturaleza propia, la exactitud de una ley, la expresión de una idea, la evidencia de una virtud.” Eduardo Torroja (Ingeniero de Caminos Español. Madrid 1899 - Madrid 1961)

Capítulo 4

Planteamiento del Problema de Optimización

4.1. Introducción

El cuarto capítulo de la presente tesis doctoral introduce el problema de optimización, describiendo tanto la naturaleza del problema como los diferentes algoritmos empleados para su resolución.

En primer lugar se describen las bases del problema a resolver, identificando la función objetivo, las restricciones a imponer y las variables de diseño que intervienen. Finalmente se expone el tratamiento numérico del problema, describiendo los diferentes algoritmos implementados en el marco de la presente tesis.

4.2. Función Objetivo

De acuerdo con los objetivos de la presente tesis descritos en el capítulo 1, el algoritmo de optimización desarrollado pretende la minimización del peso total de la estructura. En este sentido, la función objetivo caracteriza la viabilidad económica de la torre, puesto que representa la cantidad de material que hay que disponer para su construcción. Así, estudiar en profundidad su optimización ofrece relevantes ventajas tanto a los fabricantes como a

las empresas de transporte de energía.

Con todo ello, la función objetivo del problema se define a través del sumatorio de los pesos elementales de cada una de las barras que componen la torre. Así:

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{A}) = \rho l_1 A_1 + \dots + \rho l_n A_n = \rho \left(\sum_{i=1}^n l_i A_i \right) \quad (4.1)$$

donde l_i y A_i son la longitud y el área de cada elemento de la estructura respectivamente, y ρ la densidad del acero cifrada en 7850 kg/m^3 . De este modo la función objetivo depende tanto de las coordenadas nodales de la estructura a través de la longitud elemental de las barras, como de las variables discretas del problema que corresponden con las secciones de los perfiles metálicos escogidos para cada barra de la estructura.

4.3. Restricciones Empleadas para la Optimización

En el problema planteado en la presente tesis, las restricciones corresponden con las expuestas en la normativa de referencia que gobierna y define las condiciones mínimas que deben cumplir las estructuras de transporte de energía. En este sentido y tal y como se expuso en el apartado 4 del capítulo 2, la normativa vigente para las torres de alta tensión se recoge dentro de los eurocódigos de cálculo de estructuras metálicas [16] y del Reglamento de Líneas de Alta Tensión aprobado en 2008 [59].

El Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] establece que las estructuras de transporte de energía deben satisfacer las comprobaciones estructurales pertinentes de acuerdo a cualquier método sancionado por la técnica y la experiencia, asegurando los coeficientes de seguridad mínimos para los criterios de agotamiento de rotura (descohesión), fluencia, inestabilidad (pandeo) y resiliencia (resistencia a bajas temperaturas). Más concretamente, la metodología de referencia para las comprobaciones estructurales es la que puede consultarse en los citados eurocódigos [16] y que se basa en la teoría de estados límite últimos.

De este modo, la verificación del comportamiento estructural se basa en la comparativa entre los esfuerzos actuantes y la resistencia de referencia, así como en otra serie de comprobaciones que permiten asegurar la aplicabilidad de la norma al problema. En este sentido, las resistencias de las secciones transversales recogidas dentro del marco de los eurocódigos están basadas en ensayos en los que el material ha demostrado la suficiente ductilidad como para permitir un cálculo simplificado.

A continuación se exponen detalladamente las comprobaciones exigidas por la normativa.

4.3.1. Restricciones de Esbeltez Seccional o Local

La esbeltez seccional relaciona la anchura y el espesor de los diferentes elementos que componen el perfil, con el objeto de verificar el comportamiento estructural uniforme de la sección. De este modo si la sección transversal se compone de alas o elementos de extrema esbeltez su comportamiento estructural resultará sensiblemente afectado por efectos de inestabilidad seccional local como la abolladura.

En este sentido el Eurocódigo [16] recoge cuatro tipos diferentes de sección, en función de su comportamiento resistente:

- Clase I: aquéllas en las que se pueden desarrollar rótulas plásticas con la capacidad de rotación suficiente como para permitir un análisis plástico global sin conllevar una reducción de la resistencia seccional.
- Clase II: aquéllas en las que a pesar de desarrollar las rótulas plásticas, no lo realizan con la suficiente capacidad de rotación como para mantener la resistencia seccional, debido a la aparición de fenómenos de inestabilidad local por abolladura.
- Clase III: corresponden con aquellos tipos de sección en los que los fenómenos de inestabilidad son lo suficientemente significativos como para impedir desarrollar la resistencia plástica de la sección, por lo que el cálculo seccional se limita a la región elástica.
- Clase IV: son aquellas en las que los fenómenos de abolladura o de inestabilidad local son tan relevantes que impiden el desarrollo total de la resistencia elástica de la sección.

En el caso que nos ocupa el tipo de sección empleada para el cálculo es una sección clase III, por lo que el modelo resistente de cálculo corresponde con un cálculo elástico puro. De este modo la normativa actual fija un límite de esbeltez seccional para que la estructura admita el modelo elástico lineal.

Al tratarse de perfiles de sección angular, si la relación existente entre el ancho de ala y su espesor es muy elevada, el comportamiento seccional del perfil se modifica convirtiéndose en dos voladizos, tipología mucho más débil que un perfil angular y altamente susceptible a fenómenos de inestabilidad local.

En la Figura 4.1, se recogen los límites establecidos en el Eurocódigo [16] para la esbeltez seccional de perfiles angulares recogidos dentro de la parte I de reglas generales.

Con todo ello, la formulación empleada para la implementación de las restricciones de esbeltez seccional es la siguiente:

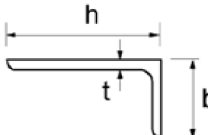
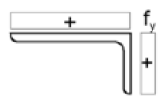
Consultar análogamente "Alas en vuelo" (véase la hoja 2 de 3)		<div>Angulares</div> 		No se aplica a angulares en contacto continuo con otros componentes		
Clase	Sección comprimida					
Ley de tensiones en las chapas (compresión positiva)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

Figura 4.1: Límites de esbeltez seccional recogidos en el Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero [16].

$$g_{l,i}(b_i, t_i) = b_i - 15 t_i \sqrt{\frac{235}{f_y}} \leq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

donde b_i y t_i son el ancho y el espesor del ala asociados a la barra i -ésima, f_y representa el límite elástico del material que la compone y n el número total de barras que definen la estructura.

4.3.2. Restricciones de Esbeltez Elemental

De acuerdo con las características estructurales expuestas en el epígrafe 2.2.1 del capítulo 2 de la presente tesis doctoral, el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59] identifica tres tipos diferentes de elementos de acuerdo a su comportamiento o función estructural. En función de la tipología de elemento dentro de la torre se establece un criterio más o menos restrictivo en cuanto a la esbeltez global del elemento.

Esta esbeltez se define como la relación existente entre la longitud total de la barra y el radio de giro de la sección, lo que limita la longitud total del elemento en función de la sección escogida. Este hecho guarda relación con la estabilidad local del elemento. La estabilidad de una estructura o de un elemento tiene una relación directa con la energía interna de la misma, de forma que será más estable cuanto menor sea su cantidad de energía [23].

De este modo si existe una leve modificación de las condiciones iniciales de la estructura, el sistema no posee la energía suficiente como para alterar su situación inicial, disipando la

energía aportada sin variar su estado. En una viga biapoyada sometida a cargas exteriores, la energía interna total depende de su rigidez o flexibilidad, de forma que a mayor flexibilidad o menor rigidez, mayor es la energía del sistema. De este modo al incrementar la longitud de la barra y mantener la sección de material, la flexibilidad del sistema aumenta. En este sentido una caída de la rigidez supone un incremento de las deformaciones haciendo más susceptible la estructura a fenómenos de inestabilidad.

Con todo ello, la formulación implementada para el cálculo de las restricciones de esbeltez elemental es la siguiente:

$$g_{e,i}(l_i, r_i) = l_i - r_i g_{0i} \leq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.3)$$

siendo l_i y r_i la longitud y el radio de giro de la sección asociada al elemento i , n el número de elementos que componen la estructura, y g_{0i} el límite establecido por la norma para la esbeltez elemental. Dicho límite se define en función del tipo de elemento, adoptando los siguientes valores:

- Montante: $g_0 = 150$
- Celosía: $g_0 = 200$
- Redundante: $g_0 = 250$

4.3.3. Restricciones sobre los Esfuerzos

Por último y relacionado con el criterio de agotamiento seccional, la normativa exige verificar la resistencia de las barras a esfuerzo axil. En este sentido la comprobación de las barras sometidas a tracción, difiere de la comprobación de los elementos a compresión. Esto es debido a que la resistencia de los elementos comprimidos está condicionada por los efectos de las inestabilidades de pandeo, por lo que los fenómenos de segundo de orden provocan en la práctica el colapso de la barra antes de que el agotamiento elástico lineal de la sección llegue a producirse.

A continuación, se exponen los criterios definidos por la normativa vigente para la verificación estructural de los elementos frente a los diferentes tipos de esfuerzo axil.

4.3.3.1. Restricciones a Tracción

El eurocódigo define que la resistencia a esfuerzo axil centrado sobre un elemento metálico con una sección clase III corresponde a la resistencia elástica de la propia sección.

De este modo, considerando un coeficiente de seguridad k , la formulación implementada para el cálculo de la restricción a esfuerzo axil de tracción queda como:

$$g_{s,i}(N_{d,i}, b_i, t_i) = k N_{d,i} - A_i f_y = k N_{d,i} - (2 b_i t_i - t_i^2) f_y \leq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.4)$$

donde tanto n , b_i , t_i como f_y mantienen el significado de los epígrafes anteriores y $N_{d,i}$ representa el valor del esfuerzo axial de la barra i obtenida del cálculo estructural.

4.3.3.2. Restricciones a Compresión

Tal y como se define en el Eurocódigo [16], la resistencia de las barras a compresión no superará la resistencia elástica para secciones clase III, y será menor que la resistencia última de la barra a pandeo. Este fenómeno es contemplado por la normativa a través de un coeficiente χ que altera la resistencia elástica de la sección y que tiene en cuenta:

- La esbeltez mecánica del elemento.
- El tipo de estructura.
- Las posibles imperfecciones geométricas de las secciones.
- La excentricidad de las cargas.
- Tensiones residuales de fabricación.

Estos condicionantes los recoge la norma a través de las curvas europeas de pandeo. Estas curvas varían en función del tipo de sección transversal, y relacionan la esbeltez mecánica de los elementos con el coeficiente de pandeo χ , tal y como puede comprobarse en las Figuras 4.2 y 4.3. Según el Eurocódigo [16] dicho coeficiente de pandeo se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,00 \quad (4.5)$$

donde $\bar{\lambda}$ representa la esbeltez mecánica del elemento y Φ el coeficiente de corrección por imperfecciones, tensiones residuales y excentricidad en la aplicación de la carga. La primera de ellas se obtiene en función de la sección transversal de la barra A , el límite elástico del material f_y , cifrado en 275 N/mm², y el axil crítico elástico para el modo de pandeo considerado N_{cr} , como:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad (4.6)$$

Si aceptamos el modelo de nudos articulados definido en el capítulo 3, la teoría elástica define el axil crítico para una barra biarticulada de acuerdo a la siguiente expresión:

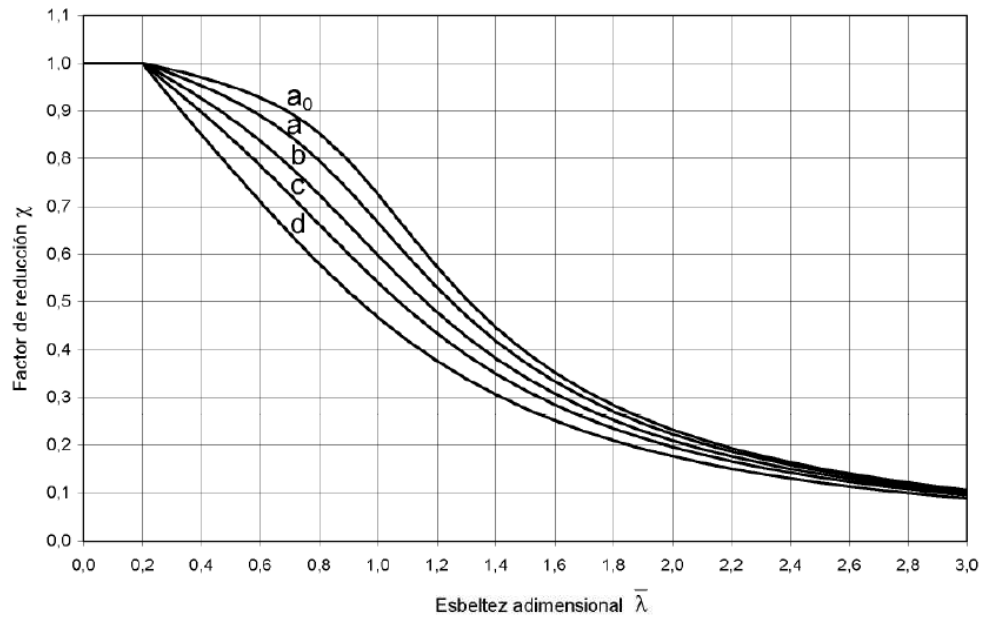


Figura 4.2: Curvas de pandeo definidas en el Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero [16].

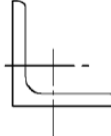
Sección transversal		Pandeo alrededor del eje	Curva de pandeo	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Secciones de perfiles de angulares		cualquiera	b	b

Figura 4.3: Curva de pandeo para perfiles angulares definida en el Eurocódigo 3: Proyecto de Estructuras de Acero [16].

$$N_{cr} = \pi^2 \frac{E I_i}{L^2} \quad (4.7)$$

siendo E el módulo de elasticidad del acero, I_i la inercia de la sección y L la longitud del elemento. Por otro lado el coeficiente de corrección Φ se obtiene a partir de la propia esbeltez mecánica y de un coeficiente de imperfección α en función de la curva europea de pandeo, y que para perfiles angulares simétricos se cifra en 0.34 (Tabla 4.1).

Con todo ello la restricción implementada para los esfuerzos de compresión en los elementos de la estructura se ajusta a la siguiente expresión:

Curva de Pandeo	a_0	a	b	c	d
Coeficiente de Imperfección α	0.13	0.21	0.34	0.49	0.76

Tabla 4.1: Coeficiente de Imperfección α según las curvas europeas de pandeo definidas en el Eurocódigo [16].

$$g_{s,i}(N_{d,i}, b_i, t_i) = -k N_{d,i} - \chi_i A_i f_y = -k N_{d,i} - \chi_i (2 b_i t_i - t_i^2) f_y \leq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.8)$$

Manteniendo la nomenclatura empleada en los anteriores epígrafes, $N_{d,i}$, b_i , t_i y f_y son, respectivamente, el axil de cálculo, el ancho de ala, el espesor del ala y el límite elástico del material asociado a la barra i -ésima de la estructura. Del mismo modo χ_i representa el valor del coeficiente de imperfecciones anteriormente citado para la barra i de la estructura.

4.3.4. Aprovechamiento Estructural

Uno de los datos de mayor utilidad en el proceso de cálculo de cualquier tipo de estructura es el grado de sobredimensionamiento, o dicho de otro modo, el porcentaje de agotamiento que presenta. Con dicha información se puede intuir de un modo rápido y sencillo cómo de condicionado está el diseño, pudiendo estimar de forma cualitativa y aproximada la capacidad que posee el proyectista de optimizarlo.

En el marco de la presente tesis doctoral, se ha adoptado para representar dicho concepto la relación entre el valor que toma la restricción y los valores límite definidos por la norma, obteniéndose así lo que de ahora en adelante se denominará como “aprovechamiento estructural”. Dicha formulación permite no sólo representar el grado de agotamiento estructural de cada una de las restricciones, sino que además proporciona dicha información de un modo adimensional.

La adimensionalidad de las restricciones, así como del problema en su conjunto, garantiza cierta generalidad al algoritmo, evitando los posibles problemas derivados de aunar en un mismo proceso de optimización restricciones con unidades y magnitudes dispares. En el caso que nos ocupa las restricciones que influyen en el diseño, tal y como se han expuesto en detalle en los epígrafes anteriores, pertenecen a 3 naturalezas muy diferenciadas:

- La esbeltez local, que estudia el comportamiento local de la sección metálica, caracterizando su capacidad resistente. En este sentido el aprovechamiento vendrá definido por la siguiente expresión:

$$a_{l,i}(b_i, t_i) = \frac{\frac{b_i}{t_i}}{15 \sqrt{\frac{235}{f_y}}} \quad (4.9)$$

- La esbeltez elemental de cada uno de las barras que componen la estructura. Este hecho tiene cierta incidencia en el comportamiento resistente de cada uno de los elementos, ya que proporciona el punto a partir del cual la esbeltez es lo suficientemente elevada como para incrementar en exceso su sensibilidad a los fenómenos de segundo orden. Tal y como se expuso anteriormente el comportamiento y la evolución de la restricción se ve condicionada por la categoría o tipo de elemento según lo establecido en el Reglamento de Líneas de Alta Tensión [59].

$$a_{e,i}(l_i, r_i) = \frac{\frac{l_i}{r_i}}{90,i} \quad (4.10)$$

- Los esfuerzos de diseño en cada uno de los elementos de la estructura. En este caso la resistencia límite de la barra estará alterada por el coeficiente χ_i siempre y cuando los esfuerzos sean de carácter compresivo. El aprovechamiento estructural vendrá definido en este caso por las siguientes expresiones en función de si el axil es de compresión o de tracción:

$$a_{s,i}(N_{d,i}, b_i, t_i) = \frac{k N_{d,i}}{\chi_i A_i \cdot f_y} \Leftrightarrow \text{Esfuerzo de Compresión} \quad (4.11)$$

$$a_{s,i}(N_{d,i}, b_i, t_i) = \frac{k N_{d,i}}{A_i f_y} \Leftrightarrow \text{Esfuerzo de Tracción} \quad (4.12)$$

En una primera aproximación, los dos primeros tipos de restricciones que condicionan el problema son parámetros adimensionales por naturaleza, lo que en principio no debería plantear problemas. No obstante los valores límite que representan el rango de valores aceptable posee magnitudes muy diferentes.

Por otro lado las restricciones en esfuerzos poseen un valor fuertemente condicionado no solo por la naturaleza del esfuerzo (tracción - compresión), que modifica la expresión de cálculo, sino por la unidad de medida adoptada para el estudio.

De este modo se demuestra la fuerte disparidad existente entre la naturaleza y magnitud de las restricciones que gobiernan el problema estructural, haciendo necesario plantear un escalado o adimensionalización de las mismas con el objeto de asegurar la generalidad del algoritmo perseguida.

4.4. Variables de Diseño

En el marco del problema planteado en la presente tesis se pueden diferenciar dos tipos de variables de diseño. Por un lado se pueden distinguir las variables que caracterizan la geometría de la torre, y por otro las variables que definen la sección transversal de los elementos que la componen.

Desde el punto de vista numérico ambos grupos de variables muestran, del mismo modo, una diferenciación clara. Las variables geométricas tienen un marcado carácter continuo, mientras que por su parte las variables seccionales están sujetas a la disponibilidad de perfiles en el mercado del acero, por lo que presentan un carácter discreto.

A continuación se exponen con mayor detalle cada una de las variables de diseño consideradas.

4.4.1. Variables Geométricas

Una de las características principales de las estructuras de transporte de energía, es tal y como se expuso en el capítulo 2, su generación modular. Este hecho equivale a asumir que la geometría global de la estructura se define a partir de una combinación de bloques de elementos con una conectividad preestablecida. Estos bloques se caracterizan por sus dimensiones generales de forma que tanto la magnitud de las bases inferior y superior como la altura del bloque, así como la longitud de las alas en los bloques tipo cruceta, caracterizan su forma final (Figura 4.4).

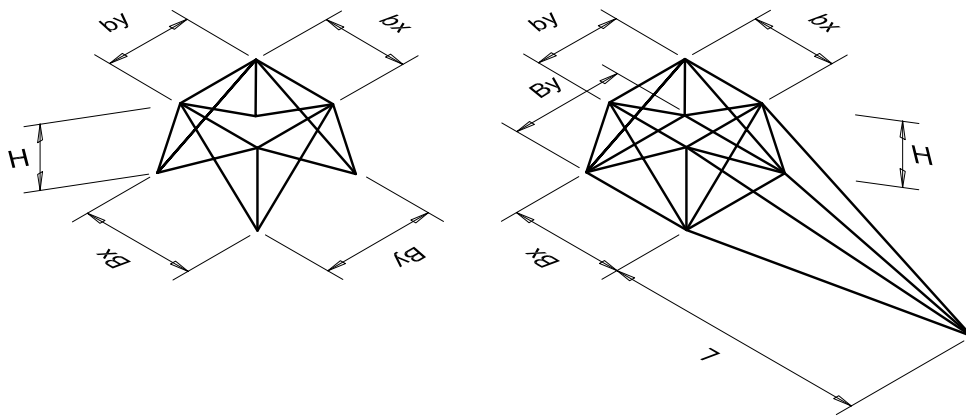


Figura 4.4: Gráfico de las variables representativas de los bloques que componen una torre de alta tensión.

La longitud de las crucetas así como la altura de los bloques son parámetros fuertemente

condicionados por aspectos eléctricos como la distancia entre los conductores o la distancia con los propios elementos metálicos de la torre. Es por ello por lo que en la presente tesis doctoral se han considerado únicamente como variables geométricas de diseño la longitud de las bases de cada bloque, omitiendo criterios puramente eléctricos en el diseño y que resultan ajenos al mero análisis estructural de la torre.

Por otro lado y con el objeto de evitar longitudes de barras despreciables o directamente carentes de sentido constructivo, deben imponerse ciertos límites laterales a la magnitud de las variables geométricas. En este sentido y tras un análisis profundo de la geometría real de torres existentes en el mercado de apoyos de alta tensión, se puede concluir una longitud mínima de las bases comprendida entre los 0.50 m y 1.00 m dependiendo de la estructura.

Del mismo modo se puede establecer un límite lateral superior. En este caso no sólo influyen parámetros estructurales sobre el comportamiento resistente global de la torre, sino que además existen otros aspectos constructivos o de gestión administrativa como puede ser el caso de la expropiación requerida por la torre. Este hecho limita el valor máximo de anchura de base dado que una magnitud excesiva supone un mayor pago de tasas de expropiación, lo cual reduce el rendimiento económico de la torre. De esta forma se ha optado por considerar un valor límite de 14.00 m como restricción lateral superior.

En cualquier caso ambos límites se han verificado con diseños reales y asumidos como aceptables, aunque el algoritmo desarrollado permite su total modificación.

4.4.2. Variables Seccionales

Las torres de alta tensión son estructuras metálicas espaciales de barras constituidas comúnmente por perfiles angulares simétricos debido a las facilidades de montaje que presentan. De este modo las principales características seccionales dependen fundamentalmente de la longitud del ala b y de su espesor t (Figura 4.5).

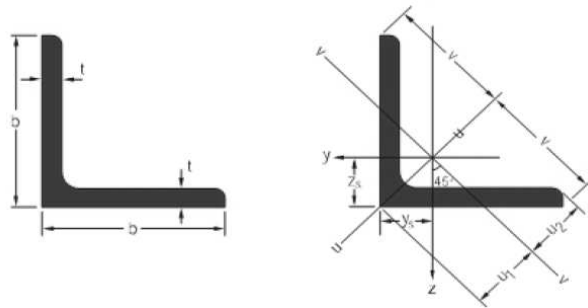


Figura 4.5: Sección transversal de un perfil angular simétrico.

A continuación se exponen las principales propiedades mecánicas de las secciones angulares simétricas:

Propiedad Mecánica		Expresión
Área		$2 b t - t^2$
Momento de Inercia	Eje v-v'	$I_v = \frac{1}{12} \left(b - \frac{t}{2} \right)^3 t$
	Eje u-u'	$I_u = \frac{1}{3} \left(b - \frac{t}{2} \right)^3 t$
Radio de Giro	Eje v-v'	$Y_v = \frac{1}{2\sqrt{6}} \left(b - \frac{t}{2} \right)$
	Eje u-u'	$Y_u = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(b - \frac{t}{2} \right)$

Tabla 4.2: Propiedades mecánicas de un perfil angular de alas iguales.

Por todo ello y desde el punto de vista continuo deben considerarse como variables tanto el ancho de ala como el espesor, puesto que definen por completo las propiedades geométricas de la sección transversal. No obstante considerando su naturaleza discreta, tanto los espesores como los anchos de ala se encuentran emparejados convirtiéndose en una única variable discreta global equivalente a alguno de los perfiles comerciales disponibles.

De este modo el problema dejaría de depender de dos variables de tipo continuo, para pasar a depender de una única variable de tipo discreto. En la presente tesis se ha considerado el catálogo de perfiles comerciales que se muestra en la Tabla 4.3, para encarar la resolución discreta del problema de optimización.

Tanto para el análisis continuo como para el estudio discreto del problema, las restricciones laterales de las variables seccionales se limitan a los límites superior e inferior dados por el catálogo comercial de perfiles.

4.5. Algoritmos de optimización

Una vez establecido el modelo de diseño óptimo, se procede a analizar los diversos algoritmos de optimización más adecuados para el problema que se plantea.

4.5.1. Algoritmo de Programación Lineal Continua (Simplex)

La programación lineal engloba el conjunto de técnicas o algoritmos diseñados para la resolución de problemas de optimización lineales condicionados por una serie de restricciones

ESPESOR t (mm)	ANCHO DE ALA b (mm)																			
	25	30	35	40	45	50	60	70	75	80	90	100	110	120	150	160	180	200	203	250
3.0	X	X	X	X	X	X														
4.0			X	X	X	X	X													
5.0					X	X	X	X												
6.0							X	X	X	X	X									
7.0								X	X	X	X									
8.0									X	X	X	X	X	X						
9.0											X									
10.0												X	X	X	X					
11.0														X						
12.0														X	X					
13.0														X			X			
14.0															X	X	X			
15.0														X		X	X	X		
16.0															X	X	X	X		
17.0																X	X	X		
18.0															X		X	X		
19.0																	X	X	X	
20.0																	X	X		X
21.0																		X		X
22.0																		X		X
22.2																			X	
23.0																		X		X
24.0																		X		X
25.0																		X		X
25.4																			X	
26.0																		X		X
27.0																				X
28.0																				X
28.6																			X	
35.0																				X

Tabla 4.3: Catálogo de perfiles empleados en la presente tesis.

a priori de tipo lineal. No obstante numerosos son los estudios en los que se generaliza su ámbito de aplicación, ampliando este tipo de técnicas a problemas de tipo no lineal a través de aproximaciones del comportamiento de las funciones involucradas.

En sus orígenes, durante la Segunda Guerra Mundial, la programación lineal se plantea como un modelo matemático desarrollado en el ámbito militar con el objeto de optimizar la

logística y el despliegue de las unidades de combate, a fin de reducir los costos bélicos y de incrementar las pérdidas del enemigo. Posteriormente durante la posguerra, se popularizó en el ámbito de la industria con el objeto de minimizar sus costes de fabricación y mejorar los procesos productivos.

De modo más concreto y aunque parece ser que la programación lineal fue utilizada mucho antes por G. Monge o bien por J. Fourier en el siglo XVIII, se considera a L. V. Kantorovich como su principal creador. La presentó por primera vez en su libro “Métodos Matemáticos para la Organización y la Producción” en 1939 [35] y la desarrolló posteriormente en su trabajo “Sobre la transferencia de masas” en 1942 [36].

Por otro lado y casi simultáneamente, G. B. Dantzig, el “padre de la programación lineal”, contribuyó decisivamente con el desarrollo del método SIMPLEX en 1947. Este método consiste en la utilización de un algoritmo iterativo que permite la optimización de la función objetivo teniendo en cuenta las restricciones planteadas. Tal y como define J. París en su tesis [69], su funcionamiento se basa en el aprovechamiento de las propiedades que presenta la región de diseño cuando se consideran restricciones linealizadas.

Este tipo de restricciones modifican la geometría de la región factible generando una región poliédrica. Partiendo de esta idea y dado que la función objetivo también es lineal, el óptimo del problema corresponde siempre con uno de los vértices de la región (Figura 4.6).

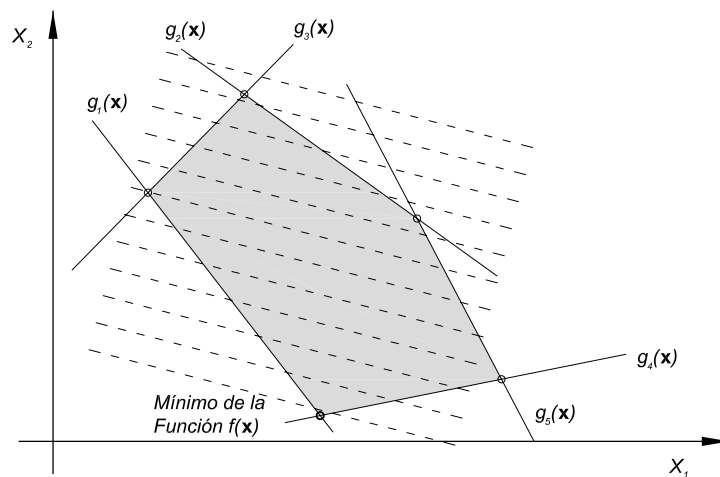


Figura 4.6: Esquema gráfico del funcionamiento del algoritmo SIMPLEX.

De este modo el algoritmo realiza, a grandes rasgos, una búsqueda orientada que recorre los vértices de la región hasta obtener la solución óptima. En este sentido, es lícito pensar que el algoritmo puede estallar en una explosión combinatoria en el caso en el que las

restricciones al problema sean numerosas. No obstante, en la práctica, y de acuerdo con la experiencia derivada de su implementación, este hecho nunca llega a suceder, debido principalmente a su forma de implementación y a la búsqueda orientada.

En cualquier caso, el método, al igual que el resto de algoritmos de programación lineal, es un algoritmo pensado para la resolución de problemas con variables continuas, perdiendo su sentido en el caso de tratar con variables de tipo discreto. Este hecho motiva que para la resolución del problema planteado en la presente tesis doctoral, dicho método requiera de ciertas modificaciones que permitan extrapolar la solución continua hacia el dominio discreto que nos ocupa. No obstante, no existe ningún método probado que permita realizar con garantías esta transformación y que no requiera una fuerte incertidumbre en su aplicación.

4.5.2. Algoritmos de Optimización en Programación Entera Mixta

En la programación lineal los algoritmos estaban especialmente diseñados para el trabajo con variables de tipo continuo. Sin embargo en numerosos problemas prácticos las variables de diseño pierden su continuidad (Figura 4.7). Este hecho hace que se compliquen sustancialmente los problemas planteados, pudiendo desembocar fácilmente en situaciones de explosión combinatoria, inabordables en la práctica con la capacidad de cálculo actual.

Un ejemplo práctico y sencillo de esta explosión combinatoria puede obtenerse al considerar un modelo simplificado compuesto por 10 barras y 6 tipos diferentes de sección. Este modelo de cálculo requiere un total $6^{10} = 60466176$ pruebas para garantizar la completa exploración de la región factible. En este sentido, asumiendo un coste computacional de 0.05 segundos por prueba, se invertiría un tiempo equivalente a 34 días naturales de cálculo para evaluar por completo todas las posibilidades. Cabe reseñar que en un problema práctico como el que se pretende analizar, las magnitudes anteriormente expuestas pueden incrementarse hasta en un orden de magnitud (100 barras y 60 secciones), por lo que resulta evidente lo inabordable del problema.

Tradicionalmente el tratamiento de este tipo de problemas se ha llevado a cabo a través de técnicas de Programación Entera Mixta, o bien de Programación Entera Estricta según sea el problema. Existen diversos métodos que permiten encarar la resolución de este tipo de problemas como el algoritmo de los cortes de Gomory, o bien, el método de Ramificación y Acotación (RA en adelante) [9], algoritmos muy utilizados en la práctica.

En el primero de los métodos [9] se resuelve el problema de optimización original relajado, en el que se incluyen restricciones adicionales que reducen la región factible sin excluir soluciones que cumplen las condiciones de optimalidad. En cada iteración se añade una restricción que se denomina corte de Gomory.

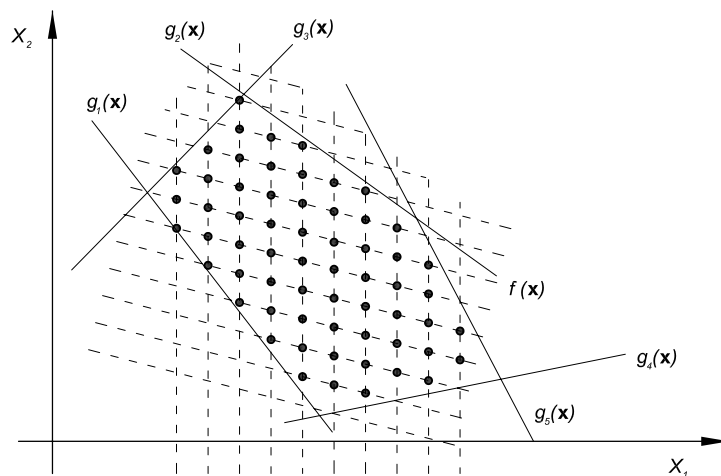


Figura 4.7: Esquema del entorno factible discreto generado en un problema de programación entera mixta.

Este procedimiento genera progresivamente una envoltura convexa de la región factible entera-mixta, lo que origina soluciones que cumplen las condiciones de integralidad [9]. En cualquier caso requiere de la implementación de métodos de programación lineal que permitan resolver el problema relajado con los cortes de Gomory.

Tal y como explica Castillo et al [9], el método de RA o Branch and Bound en la literatura anglosajona resuelve un problema de programación entera mixta a través de una secuencia ordenada de problemas lineales, que se obtienen relajando las restricciones de integralidad y añadiendo restricciones adicionales. El número de restricciones adicionales crece a medida que el procedimiento de RA progresa, permitiendo separar la región factible en subregiones complementarias.

El principal inconveniente de este algoritmo reside en el coste computacional que exige sobre todo en aquellos problemas en los que existe un gran número de variables y restricciones, dado que conceptualmente se fundamenta en un criterio de búsqueda, prueba y error.

4.5.3. Algoritmos de Optimización Difusa

Los algoritmos de Optimización Difusa se fundamentan en la teoría de los conjuntos difusa enunciada por primera vez por Lofti A. Zadeh [86], profesor de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Berkeley en California en el año 1969, y completada por el mismo autor en el año 1973. Tal y como pudo comprobar el autor de la presente tesis [50], la idea

principal de esta teoría consiste en una reinterpretación de la lógica clásica en donde las entidades dejan de ser bivaluadas (verdadero o falso), para poseer un grado de pertenencia a un conjunto a priori concreto y discreto representado por un número real comprendido en el intervalo $[0,1]$ (Figura 4.8).

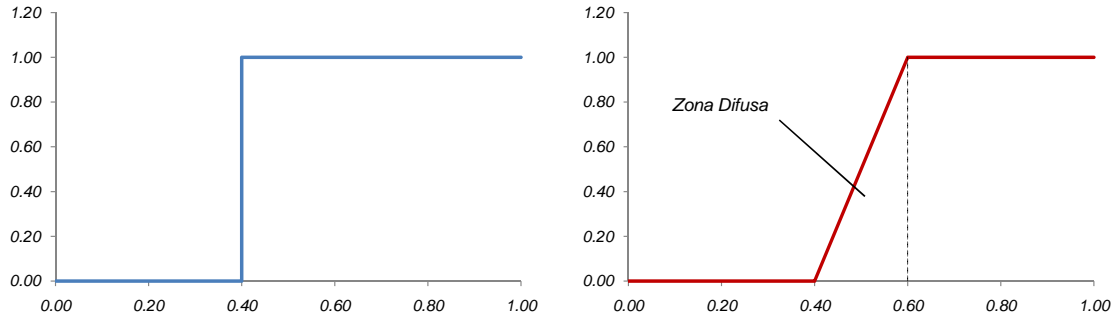


Figura 4.8: Funciones representativas de la teoría de conjuntos tradicional (izquierda) y difusa (derecha) [50].

Recientemente Zadeh ha reinterpretado los sistemas *fuzzy* o difusos como computación con palabras, y ha introducido la teoría de computación con percepciones subjetivas [88]. De este modo, se pueden articular reglas heurísticas basadas en el lenguaje natural que permitan la composición de los diferentes conjuntos que intervienen en el problema con el objeto de proporcionar un resultado adecuado.

En el campo de la optimización, cobra relativa importancia la aplicación de este tipo de métodos en aquellos problemas que no se encuentran taxativamente restringidos por funciones laterales, como es el caso de problemas de transporte o logística. De este modo empleando conjuntos difusos se consiguen resultados satisfactorios con un coste computacional relativamente bajo. En este sentido la efectividad de este tipo de algoritmos se diluye en problemas fuertemente restringidos, como es el caso de los problemas de optimización estructural sometidos a las comprobaciones exigidas por la normativa.

4.5.4. Algoritmos Genéticos

La Programación Evolutiva surge principalmente a raíz del trabajo de Fogel, Owens y Walsh [22] en el que se consideraba a los individuos de una población, conocidos aquí como organismos, “máquinas de estado finito (FSM)”. De este modo los organismos que mejor resuelven alguna de las funciones objetivo obtienen la oportunidad de reproducirse. Antes de producirse los cruces para generar la descendencia se realiza una mutación sobre los padres.

Por otra parte, los algoritmos genéticos pertenecen a una rama de la Inteligencia Artificial que imita la evolución biológica de los seres vivos para la resolución de problemas de optimización o búsqueda. Fueron desarrollados principalmente en la década de los '70, a raíz de la publicación de J. Holland sobre sistemas adaptativos [32]. Este tipo de métodos se basan en el desarrollo genético-molecular de la naturaleza, haciendo evolucionar una población de individuos a través de acciones aleatorias similares a los procesos naturales de mutación, reproducción o recombinación genética.

De modo más concreto, los algoritmos genéticos parten de una población lo suficientemente elevada y recomendablemente aleatoria. Una vez identificados cada uno de los elementos de la población, llamados cromosomas, se puntúa cada uno de ellos identificando su probabilidad de reproducción.

Una vez se haya estudiado toda la población inicial se procede a generar una nueva, permitiendo la reproducción de los cromosomas en función de su puntuación, e incluso, bajo una cierta probabilidad, su mutación. De este modo se establece un algoritmo iterativo que evoluciona adaptándose al problema que pretende resolver.

El problema de este tipo de algoritmos reside en la fuerte incertidumbre que rodea su operación y funcionamiento. En la mayoría de los casos la evolución del algoritmo resulta muy difícil de predecir, dependiendo fuertemente de la codificación empleada para la representación del problema. Es por ello que este tipo de algoritmos presentan un buen comportamiento en el momento en que se calibran completamente para la resolución de un problema concreto, pero al variar las condiciones o características del problema el funcionamiento del algoritmo puede variar completamente.

De este modo el algoritmo pierde generalidad, haciendo poco realista pretender una metodología genérica basada en algoritmos genéticos que permita la resolución de cualquier tipo de estructura de barras articuladas. Debido a ello, en la presente tesis se ha desechado su aplicación.

4.5.5. Algoritmos de Optimización Estocástica (Simulated Annealing)

Tal como su nombre indica, la Programación Estocástica trata problemas de Programación Matemática en cuya formulación aparece algún elemento de naturaleza estocástica. En este sentido, mientras que en un problema de Programación Matemática tradicional, ya sea Programación Lineal, Entera o Mixta, todas las variables involucradas poseen un carácter marcadamente determinístico, en los problemas de Programación Estocástica alguna de las variables posee un comportamiento aleatorio.

De un modo más genérico y de acuerdo a lo expuesto por Prekopa [73], la Programa-

ción Estocástica trata problemas de Programación Matemática en los que algunos de los parámetros son variables aleatorias. En este sentido se puede encarar el tratamiento del problema bien estudiando las propiedades estadísticas particulares del valor óptimo aleatorio o de otras variables aleatorias presentes en el problema, o bien mediante su reformulación hacia otro problema de decisión en el que se tienen en cuenta la distribución de probabilidad conjunta de los parámetros aleatorios.

La Programación Estocástica comenzó en 1955 con los trabajos de Dantzig y Beale, y ya en la misma década, alcanzó con Markowitz una aplicación muy destacada al problema de selección de carteras [48], hecho que le haría merecedor del Premio Nóbel.

El método de Recocido Simulado o Simulated Annealing es una técnica de optimización estocástica [56] que ha demostrado convenientemente su fiabilidad en el tratamiento de problemas con variables de diseño continuas y discretas. Fue desarrollada inicialmente por Kirkpatrick en 1983 [38] por analogía con el recocido o temple de los materiales metálicos. La metodología se basa en los estudios realizados sobre la disipación térmica y la organización de la estructura cristalina de sólidos metálicos, realizados por Metropolis durante la década de los '50 [54].

Metropolis estudiaba la evolución de la disposición de los cristales metálicos a través de la generación de cadenas de Markov de sucesos entre el estado inicial y final del proceso de enfriamiento. Dicha evolución o transición entre estados energéticos está gobernada a través de la energía interna de Gibbs. En este sentido para evitar la implementación de costosos métodos de integración, la metodología expuesta por Metropolis se basaba en la aplicación del Algoritmo de Monte Carlo para resolver el problema.

Kirkpatrick [38] aplicó por primera vez esta teoría al campo de la optimización con el problema del viajero. Posteriormente otros autores como Cerny [11] y Hajek [29], o más recientemente Wah [83], han continuado desarrollando las posibilidades del algoritmo y completando sus capacidades.

Ya en el siglo XXI, autores como Shea y Zaho [78] o González Vidosa [26] y su equipo, formado por Alcalá [2], Payá [70], Yepes [85], Carrera [8] y Perea [72], han aplicado con éxito esta técnica a diferentes problemas de ingeniería con estructuras de diversa naturaleza. En particular, los primeros llegaron a plantear el diseño de una celosía metálica en voladizo considerando variables relacionadas con la topología de la estructura, y que se ejecutó con éxito en Londres.

En cualquier caso, este algoritmo fue desarrollado específicamente para el tratamiento de variables discretas, incorporando de forma natural los aspectos más característicos del problema planteado en la presente tesis doctoral. En el capítulo 6 del presente documento, se estudiará la metodología del algoritmo empleado y se desarrollarán con mayor profundidad

sus particularidades.

4.6. Resumen

El problema planteado en la presente tesis doctoral pretende la optimización del peso total de la estructura considerando las restricciones exigidas por la normativa española. En este sentido el reglamento vigente exige el cumplimiento de tres restricciones fundamentales:

- La esbeltez local, que estudia el comportamiento local de la sección metálica, caracterizando su capacidad resistente.
- La esbeltez elemental de cada uno de las barras que componen la estructura, y que relaciona la longitud del elemento con las características de la sección metálica.
- Los esfuerzos de diseño en cada uno de los elementos de la estructura, diferenciando entre compresión y tracción.

Debido a la diferente naturaleza de cada una de las restricciones, poder aglutinar la información de todas ellas exige un cierto tratamiento. Es por ello que con el objetivo de alcanzar un mayor grado de generalidad en el algoritmo propuesto, se ha buscado su adimensionalización. Para ello, se ha recurrido al concepto de “aprovechamiento estructural”. Dicho concepto representa el grado de agotamiento de la restricción de un modo adimensional, al obtenerse a través de la relación existente entre el propio valor de la restricción y el del límite establecido por la norma. De este modo se consigue homogeneizar la información de las diversas restricciones, permitiendo su tratamiento conjunto.

Otra de las características más relevantes del problema planteado en la presente tesis doctoral es el de las variables que intervienen. En este sentido el problema planteado considera el empleo de variables de tipo continuo y tipo discreto de forma conjunta. De forma más detallada las variables que caracterizan el problema son las siguientes:

- Variables Seccionales: definen la sección transversal de la estructura. Para garantizar la rentabilidad económica de la solución, las secciones escogidas deben ajustarse a perfiles existentes en catálogos comerciales. La sección más habitual en las estructuras de transporte de energía es la sección angular de lados iguales, que se caracteriza fundamentalmente por la longitud de ala y su espesor. En este sentido, ambas variables por separado poseen un carácter discreto, no obstante y debido a la necesidad de ajustarse a catálogos comerciales, el carácter discreto caracteriza también el conjunto de ambas variables.

- Variables Geométricas: definen la geometría global de la estructura. En este sentido y dado el carácter modular de este tipo de estructuras, las variables consideradas son las dimensiones de las bases superior e inferior de cada bloque o módulo, manteniendo la altura total de la estructura y la longitud de las alas con el fin de no variar la separación entre conductores.

Con todo ello, el planteamiento del problema se adoptará implementando algoritmos de optimización estocástica. Más concretamente se ha escogido el “simulated annealing” o recocido simulado. Esta teoría enunciada inicialmente por Kirkpatrick en la década de los '80 [38], se basa en una analogía entre el temple de los metales y los procesos de optimización. En este sentido, el proceso de recocido o temple de los metales, pretende la modificación de la estructura cristalina de un metal para alcanzar configuraciones con una energía interna menor, incrementando para ello la temperatura del sistema. Este fenómeno físico tiene una correlación evidente con el proceso de optimización, por lo que basándose en las teorías energéticas, Kirkpatrick formuló su algoritmo de optimización aplicándolo con éxito a la resolución del problema del viajante. En cualquier caso, la formulación inicial permite incorporar de modo natural el tratamiento conjunto de ambos tipos de variables, motivo por el cual se ha decidido desarrollar una metodología basada en este algoritmo.

En los próximos capítulos se tratarán específicamente los diferentes aspectos que caracterizan la metodología propuesta en la presente tesis doctoral, desarrollando en mayor profundidad las particularidades del algoritmo del recocido simulado.

“Cuanto más se dividen los obstáculos son más fáciles de vencer.” Concepción Arenal (Escritora y socióloga española. La Coruña 1820 - Vigo 1893)

Capítulo 5

Análisis de Sensibilidad

5.1. Introducción

El análisis de sensibilidad corresponde con un conjunto de técnicas que permiten alcanzar un grado de comprensión más profundo sobre el comportamiento de una función en el entorno de un punto. Para ello, a través del cálculo diferencial, se obtiene la relación entre la variación que experimenta la función y la modificación de la o las variables que la originan. De este modo y a través del desarrollo en serie de Taylor se consigue obtener los resultados de la función evitando un recálculo de la misma como:

$$f(x) \approx f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n = \sum_{i=0}^n \frac{f^{(i)}(a)}{i!}(x-a)^i \quad (5.1)$$

La consecuencia directa del orden del análisis reside en el grado de precisión que se obtiene con la aproximación de Taylor. Un análisis de primer orden supone, aproximar la función en el entorno del punto calculado a través de la recta tangente a la función en dicho punto; mientras que un análisis de segundo orden supone la aproximación a través de la parábola tangente. Sucesivamente y conforme se aumenta el orden del análisis se incrementa el grado de la curva tangente a la función en el punto, y con ello la precisión obtenida en la aproximación de Taylor (Figura 5.1).

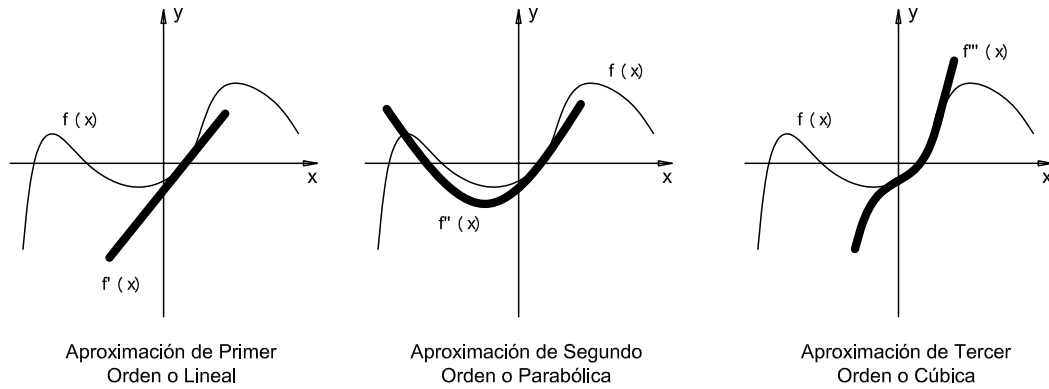


Figura 5.1: Representación gráfica de las aproximaciones de primer, segundo y tercer orden para una función con una única variable.

En la presente tesis se ha desarrollado un análisis de sensibilidad de primer orden de la función peso total de la estructura y de cada una de las restricciones que intervienen en el proceso de optimización. A continuación se procede a exponer detalladamente la formulación empleada, considerando la siguiente notación:

$g_{l,i}(\xi)$ Restricción a esbeltez local o seccional del material i .

$g_{e,i}(\xi)$ Restricción a esbeltez elemental de la barra i .

$g_{s,i}(\xi)$ Restricción por esfuerzo de la barra i .

$F(\xi)$ Función Objetivo.

ξ_i Variable de diseño i .

$x_{i,s,t}$ Variable de diseño geométrica i , según la dirección s , del bloque t .

b_i Ancho de ala del material i .

t_i Espesor de ala del material i .

A_i Área del perfil del elemento i .

r_i Radio de giro del elemento i .

$u_{k,i,j}$ Coordenada i del nodo j de la barra k .

γ_s Peso específico del acero.

5.2. Metodología de Diferenciación

Tal y como se expone en Hernández [30], los análisis de sensibilidad de primer orden en problemas estáticos tienen como principal objetivo obtener las primeras derivadas de la función objetivo y de las restricciones del problema con respecto a las variables de diseño. En el mismo texto Hernández plantea diferentes técnicas aplicables para la derivabilidad de

las funciones objetivo y de las restricciones de un problema de optimización estructural. Las técnicas más relevantes empleadas para el estudio de sensibilidad respecto a las variables de diseño del problema son:

- Diferenciación Analítica Directa
- Diferenciación mediante el método de la Variable Adjunta
- Diferenciación Numérica

En la presente tesis se ha considerado el estudio de la sensibilidad del problema a través de la diferenciación directa. No obstante a continuación se detallan en profundidad cada uno de los métodos enunciados con el objeto de comparar las ventajas que ofrece cada uno de ellos y justificar la técnica adoptada.

5.2.1. Diferenciación Numérica

Siguiendo las tesis de Navarrina [63] y París [69], para llevar a cabo el cálculo diferencial de las diversas funciones objetivo se puede recurrir a diferentes técnicas que abarcan desde métodos puramente numéricos hasta métodos basados en los desarrollos analíticos. Una de ellas consiste en la aplicación de algoritmos de diferenciación numérica, en la que se obtiene una aproximación de las derivadas a través de métodos numéricos como las Diferencias Finitas, tal y como exponen Choi y Kim en su publicación del año 2005 [19].

$$\frac{dg_j(\xi)}{d\xi_i} = \frac{g_j|_{\xi+h\delta_i} - g_j|_{\xi}}{h} + \theta(h) \quad (5.2)$$

$$\xi = \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_k \\ \vdots \\ \xi_n \end{Bmatrix} \quad \delta_i = \begin{Bmatrix} \delta_{i1} \\ \vdots \\ \delta_{ik} \\ \vdots \\ \delta_{in} \end{Bmatrix} \rightarrow \delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = i \\ 0 & \text{si } k \neq i \end{cases} \quad (5.3)$$

En el caso que nos ocupa, y tal y como expone París [69], en problemas de cálculo de estructuras, la ecuación de estado está ligado a la formulación de los elementos finitos y en consecuencia, será necesario resolver un sistema con diferente matriz y diferente vector de términos independientes para cada derivada. Asimismo, con este algoritmo para conseguir mejorar la aproximación realizada debe reducirse en la medida de lo posible el valor del parámetro h , lo que supone un incremento de los errores numéricos al restar números muy

similares y dividir por números próximos a cero. Con todo ello, esta metodología encarece excesivamente el coste computacional del problema, incrementando al mismo tiempo, los errores numéricos, lo que limita la precisión y por tanto la fiabilidad del propio método.

5.2.2. Diferenciación Analítica Directa

Otro de los posibles métodos para la implementación del análisis de sensibilidad pasa por la programación analítica directa de las derivadas respecto de las variables de diseño del problema. De este modo se elimina cualquier tipo de incertidumbre o error inherente a cualquier método numérico, proporcionando la máxima exactitud posible al algoritmo. En los epígrafes sucesivos se estudiará la formulación implementada como parte del análisis de sensibilidad.

5.2.3. Diferenciación mediante el Método de la Variable Adjunta

El algoritmo de diferenciación analítica directa, tal y como se verá a continuación, puede requerir la resolución de un número de sistemas de ecuaciones muy elevado. Como alternativa tanto Hernández [30] como París [69], describen el método de la diferenciación mediante el empleo de la variable adjunta. De este modo a partir de un cambio de variable se reduce el problema a calcular el término independiente y a aplicar las sustituciones hacia delante y hacia atrás utilizando las matrices triangulares y diagonal resultantes de factorizar la matriz del sistema por el método de Cholesky.

En particular Hernández [30] subraya que la comparación de eficacia entre el método de diferenciación directa y el de la variable adjunta estriba en el número de sistemas de ecuaciones asociado a cada uno de ellos. En este sentido en la diferenciación directa debe resolverse un sistema de ecuaciones por cada caso de carga y variable de diseño. Sin embargo empleando el método de la variable adjunta el número de sistemas depende tanto del número de casos de carga como del número de condiciones o restricciones aplicadas. Es por ello que en problemas en donde el número de restricciones es muy superior al de variables, como es el caso que nos ocupa, el método de la variable adjunta pierde eficacia computacional.

5.3. Derivadas Elementales

Se define como derivadas elementales aquellas derivadas que sin ser representativas del funcionamiento de una restricción o de la función objetivo son estrictamente necesarias para averiguar su comportamiento. En el caso que nos ocupa, estas derivadas corresponden a la

longitud del elemento, a las propiedades geométricas de la sección (área e inercia), y a los esfuerzos elementales sobre cada una de las barras de la estructura.

5.3.1. Derivada de la Longitud del Elemento

La longitud de cada uno de los elementos o barras que componen la estructura es una de sus características fundamentales que condiciona la resistencia frente a inestabilidades de pandeo. En este sentido un valor elevado de la longitud elemental supone un incremento de la esbeltez local de las barras, disminuyendo considerablemente su resistencia frente a esfuerzos de compresión.

Con todo ello, y de acuerdo con la nomenclatura expuesta en la Figura 5.2, la longitud elemental de cada una de las barras de la estructura, se define como:

$$l_j = \sqrt{(u_{j,x,2} - u_{j,x,1})^2 + (u_{j,y,2} - u_{j,y,1})^2 + (u_{j,z,2} - u_{j,z,1})^2} \quad (5.4)$$

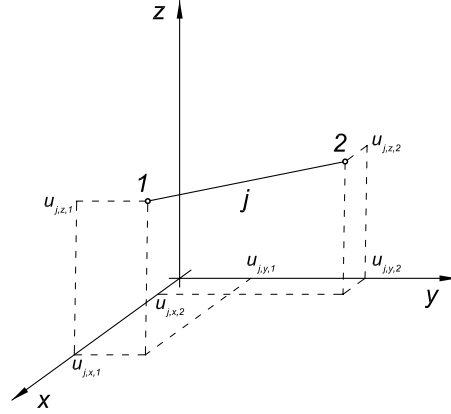


Figura 5.2: Notación elemental de las coordenadas nodales.

De este modo la derivada de la longitud será nula para las variables seccionales y para todas aquellas variables geométricas que no afecten a los nodos extremos de la barra analizada. En este sentido la siguiente formulación gobierna el comportamiento de la derivada elemental de las longitudes:

$$\frac{\partial l_j(\xi)}{\partial \xi_i} = \begin{cases} \frac{1}{2l_j} \left(\sum_{l=1}^3 2(u_{j,2,l} - u_{j,1,l}) \left(\frac{\partial u_{j,2,l}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial u_{j,1,l}}{\partial \xi_i} \right) \right) & \text{si } \xi_i = x_{k,s,t} \Leftrightarrow t \in j \\ 0 & \text{si } \xi_i = x_{k,s,t} \Leftrightarrow t \notin j \\ 0 & \text{si } \xi_i \neq x_{k,s,t} \end{cases} \quad (5.5)$$

5.3.2. Derivada de las Propiedades Geométricas de la Sección

Las propiedades geométricas de la sección son los aspectos fundamentales que caracterizan el comportamiento estructural del conjunto. Definen la resistencia estructural de las barras, su esbeltez y el peso total del sistema. Las principales características seccionales que intervienen en el cálculo son:

- Área: proporciona la resistencia estructural de cada una de las barras frente a tracción. Las expresiones empleadas en la presente tesis para gobernar el comportamiento de las derivadas del área frente a las variables de diseño son:

$$\frac{\partial A_j(\xi)}{\partial \xi_i} = \begin{cases} 2 t_j & \text{si } \xi_i = b_j \\ 2 (b_j - t_j) & \text{si } \xi_i = t_j \\ 0 & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.6)$$

- Inercia: caracteriza el comportamiento de los elementos frente a pandeo. La derivada de la inercia de las secciones de cada uno de los materiales sigue la siguiente expresión:

$$\frac{\partial I_j(\xi)}{\partial \xi_i} = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^2 & \text{si } \xi_i = b_j \\ \frac{-1}{8} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^2 & \text{si } \xi_i = t_j \\ 0 & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.7)$$

- Radio de Giro: define la esbeltez de los elementos de la estructura. De acuerdo con las expresiones definidas en el capítulo 4, las derivadas del radio de giro frente a las variables de diseño son:

$$\frac{\partial r_j(\xi)}{\partial \xi_i} = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{6}} & \text{si } \xi_i = b_j \\ \frac{-1}{4\sqrt{6}} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^2 & \text{si } \xi_i = t_j \\ 0 & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.8)$$

5.3.3. Derivada de las Fuerzas Exteriores

Las fuerzas exteriores al sistema son las responsables directas del comportamiento estructural de la torre, puesto que caracterizan las solicitaciones así como los esfuerzos

interiores resultantes. De modo genérico dichas fuerzas se pueden definir de acuerdo a la siguiente formulación:

$$\mathbf{f}_j = \mathbf{f}_{w,j} + \mathbf{f}_{v,j} + \mathbf{t}_{c,j}, \quad (5.9)$$

siendo:

- $\mathbf{f}_{w,j}$ peso propio del elemento, que de acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 3 se define según la siguiente expresión:

$$\mathbf{f}_{w,j} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma_s A_j \frac{l_j}{2} \\ 0 \\ 0 \\ -\gamma_s A_j \frac{l_j}{2} \end{pmatrix} \quad (5.10)$$

- $\mathbf{f}_{v,j}$ fuerza debida al viento sobre la estructura. En función del ángulo de incidencia (α) se puede descomponer en la siguiente expresión:

$$\mathbf{f}_{w,j} = \begin{pmatrix} q_v b_j \frac{l_j}{2} \cos(\alpha) \\ q_v b_j \frac{l_j}{2} \sen(\alpha) \\ 0 \\ q_v b_j \frac{l_j}{2} \cos(\alpha) \\ q_v b_j \frac{l_j}{2} \sen(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

- $\mathbf{t}_{c,j}$ representa el tense de los conductores, aplicado sobre los puntos de amarre de la estructura. Esta carga es independiente de las características propias de la torre o estructura de transporte.

A tenor de las expresiones anteriormente expuestas, y planteando la diferenciación respecto a las variables de diseño del problema, se obtiene la formulación implementada para el análisis de sensibilidad:

$$\frac{\partial \mathbf{f}_j}{\partial \xi_i} = \frac{\partial \mathbf{f}_{w,j}}{\partial \xi_i} + \frac{\partial \mathbf{f}_{v,j}}{\partial \xi_i} + \frac{\partial \mathbf{t}_c}{\partial \xi_i} \quad (5.12)$$

donde $\frac{\partial \mathbf{f}_{w,j}}{\partial \xi_i}$ representa la derivada del peso propio del elemento, gobernada a través de la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \mathbf{f}_{w,j}}{\partial \xi_i} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\gamma_s \frac{\partial A_j}{\partial \xi_i} \frac{l_j}{2} - \frac{\gamma_s}{2} A_j \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} \\ 0 \\ 0 \\ -\gamma_s \frac{\partial A_j}{\partial \xi_i} \frac{l_j}{2} - \frac{\gamma_s}{2} A_j \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Por otro lado $\frac{\partial \mathbf{f}_{v,j}}{\partial \xi_i}$, equivale a la derivada de la fuerza del viento para un ángulo de incidencia (α). De este modo atendiendo a la formulación expuesta en el capítulo anterior, se obtienen las siguientes expresiones:

Llegados a este punto se puede encarar la resolución de la primera derivada de los desplazamientos nodales bien a través de la inversión de la matriz de rigidez, lo cual es difícil y costoso [30], o bien a través de un sistema lineal de ecuaciones en el que la matriz de coeficientes coincide con la matriz de rigidez.

$$\mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \xi_i} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \xi_i} \mathbf{u} \quad (5.16)$$

Una vez obtenida la primera derivada de los desplazamientos nodales se puede obtener la derivada de los esfuerzos elementales por aplicación de la regla de la cadena:

$$\frac{\partial \mathbf{N}_{d,j}}{\partial \xi_i} = \frac{\partial \mathbf{S}_j}{\partial \xi_i} \mathbf{u}_j + \mathbf{S}_j \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \xi_i} = \left(\frac{\partial \mathbf{D}_j}{\partial \xi_i} \mathbf{B}_j + \mathbf{D}_j \frac{\partial \mathbf{B}_j}{\partial \xi_i} \right) \mathbf{u}_j + (\mathbf{D}_j \mathbf{B}_j) \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \xi_i} \quad (5.17)$$

siendo las derivadas de la matriz de compatibilidad y de la matriz de rigidez elemental respecto de las variables principales del problema, las siguientes expresiones:

$$\mathbf{B}_j \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial \xi_i} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial \alpha_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} & -\frac{\partial \beta_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} & -\frac{\partial \gamma_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} & \frac{\partial \alpha_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} & \frac{\partial \beta_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} & \frac{\partial \gamma_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} \end{bmatrix}, \quad (5.18)$$

$$\frac{\partial \mathbf{D}_j}{\partial \xi_i} = \left[E \left(\frac{\frac{\partial A_j}{\partial \xi_i} l_j - A_j \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i}}{l_j^2} \right) \right], \quad (5.19)$$

donde la derivada de los cosenos directores se define como:

$$\frac{\partial \alpha_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} = \frac{1}{l_j^2} \left(\left(\frac{\partial u_{j,2,x}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial u_{j,1,x}}{\partial \xi_i} \right) l_j - (u_{j,2,x} - u_{j,1,x}) \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} \right) \quad (5.20)$$

$$\frac{\partial \beta_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} = \frac{1}{l_j^2} \left(\left(\frac{\partial u_{j,2,y}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial u_{j,1,y}}{\partial \xi_i} \right) l_j - (u_{j,2,y} - u_{j,1,y}) \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} \right) \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial \gamma_{\mathbf{u}'}'}{\partial \xi_i} = \frac{1}{l_j^2} \left(\left(\frac{\partial u_{j,2,z}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial u_{j,1,z}}{\partial \xi_i} \right) l_j - (u_{j,2,z} - u_{j,1,z}) \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} \right) \quad (5.22)$$

5.4. Análisis de Sensibilidad de las Restricciones

Parte de los datos requeridos por los algoritmos de optimización propuestos son las primeras derivadas de las restricciones respecto de las variables de diseño. En el presente epígrafe se expone la formulación empleada para el análisis de sensibilidad tanto de la función objetivo como de las restricciones implementadas en la tesis doctoral que se expone.

5.4.1. Sensibilidad de las Restricciones en Esbeltez Seccional

De acuerdo con la expresión implementada expuesta en el capítulo 4 para la restricción de esbeltez seccional, ésta es independiente del valor que toman las variables de diseño geométricas, por lo que su primera derivada resultará nula para este tipo de variables de diseño:

$$\frac{\partial g_{l,j}(\boldsymbol{\xi})}{\partial \xi_i} = 0 \quad \text{si } \xi_i = x_{j,s,t} \quad (5.23)$$

Sin embargo para las variables seccionales el comportamiento de la esbeltez es lineal, en cualquiera de los casos. Este hecho permite que el análisis de sensibilidad de primer orden sea capaz de predecir con exactitud el comportamiento de la restricción.

De este modo el análisis de sensibilidad de las restricciones de esbeltez local respecto de las variables de diseño seccionales se resumen en la siguiente expresión:

$$\frac{\partial g_{l,j}(\boldsymbol{\xi})}{\partial \xi_i} = \begin{cases} 1 & \text{si } j = i, \xi_i = b_j \\ -15 \sqrt{\frac{235}{f_y}} & \text{si } j = i, \xi_i = t_j \\ 0 & \text{si } j \neq i \end{cases} \quad (5.24)$$

5.4.2. Sensibilidad de las Restricciones en Esbeltez Elemental

Si se desarrolla la expresión descrita en el epígrafe 4.3.2 del capítulo 4 de la presente tesis y sustituyendo el valor del radio de giro por la expresión descrita posteriormente en la tabla 4.2 se obtiene:

$$g_{e,j}(\boldsymbol{\xi}) = \frac{l_j}{r_j} - g_{0j} = \frac{l_j}{\frac{1}{\sqrt{6}} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)} - g_{0,j} \quad (5.25)$$

En cualquier caso se observa que la restricción depende tanto de las variables geométricas como de las seccionales, de forma que la primera derivada de las restricciones se obtiene como:

$$\frac{\partial g_{e,j}(\boldsymbol{\xi})}{\partial \xi_i} = \begin{cases} -\sqrt{6} \frac{l_j}{r_j^2} \left(\frac{\partial r_j}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } j = i, \xi_i = b_j \text{ ó } \xi_i = t_j \\ \sqrt{6} \frac{l_j}{r_j^2} \left(\frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.26)$$

5.4.3. Sensibilidad de las Restricciones en Esfuerzos

Una vez expuestas las expresiones que gobiernan el análisis de sensibilidad de las restricciones en esbeltez, tanto elemental como seccional, se expone a continuación la formulación implementada para el análisis de sensibilidad de las restricciones a los esfuerzos internos de cada una de las barras.

5.4.3.1. Restricciones a Tracción

La normativa vigente limita la sollicitación máxima de los elementos de la torre sometidos a tracción a la resistencia seccional del perfil metálico que la define. De este modo de acuerdo con la expresión deducida en el capítulo 4, se obtiene:

$$g_{s,j}(\xi) = k N_{d,j} - (2 b_j t_j - t_j) t_j f_y \quad (5.27)$$

Calculando las derivadas de la expresión anterior con respecto a las variables de diseño y considerando un coeficiente de seguridad mínimo k , se consigue la formulación implementada para la sensibilidad de la restricción a tracción como:

$$\frac{\partial g_{s,j}(\xi)}{\partial \xi_i} = \begin{cases} k \frac{\partial N_{d,j}}{\partial \xi_i} - 2 t_j^2 f_y & \text{si } \xi_i = b_j \\ k \frac{\partial N_{d,j}}{\partial \xi_i} - 2 (b_j - t_j) f_y & \text{si } \xi_i = t_j \\ k \frac{\partial N_{d,j}}{\partial \xi_i} & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.28)$$

5.4.3.2. Restricciones a Compresión

Las restricciones a compresión están caracterizadas principalmente por el efecto de las inestabilidades de pandeo sobre las barras. De esta forma la normativa propone un coeficiente corrector a la resistencia última de la sección metálica del elemento, tal y como se expone con mayor profundidad en el capítulo 4 sobre el Planteamiento del Problema de Optimización. En este sentido la expresión que gobierna la restricción es:

$$g_{s,j}(\xi) = k N_{d,j} - \xi_j (2 b_j t_j - t_j) t_j f_y \quad (5.29)$$

Atendiendo a la formulación expuesta en el epígrafe 4.3 del capítulo 4, la expresión del coeficiente ξ_i depende tanto de las variables geométricas como de las seccionales. A continuación se tratará específicamente la sensibilidad del parámetro ξ_i para posteriormente poder encarar con mayor claridad la sensibilidad global de la restricción.

$$\frac{\partial \chi_j}{\partial \xi_i} = -\frac{1}{2} \left(\Phi_j + \sqrt{\Phi_j^2 - \bar{\lambda}_j^2} \right)^{-\frac{3}{4}} \left(\frac{\partial \Phi_j}{\partial \xi_i} + \frac{1}{2} \left(\Phi_j^2 - \bar{\lambda}_j^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \left(2 \Phi_j \frac{\partial \Phi_j}{\partial \xi_i} - 2 \bar{\lambda}_j \frac{\partial \bar{\lambda}_j^2}{\partial \xi_i} \right) \right) \quad (5.30)$$

De este modo el coeficiente corrector queda en función de la esbeltez reducida elemental [16] [60] y del coeficiente Φ que integra el efecto de las imperfecciones en la geometría de la sección y de las tensiones residuales de fabricación sobre la resistencia seccional de las barras. Este coeficiente se obtiene, tal y como se expuso en el capítulo 4, a través de composición de la esbeltez reducida y del coeficiente corrector de la tipología seccional α .

El coeficiente α depende exclusivamente de la tipología de perfil metálico del elemento, por lo que en el caso que nos ocupa no depende de ninguna de las variables principales del problema. Con todo ello la expresión que permite completar la derivada de primer orden del coeficiente corrector del pandeo se ajusta a la siguiente formulación:

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial \xi_i} = \frac{1}{2} \left(\alpha \frac{\partial \bar{\lambda}_j}{\partial \xi_i} + 2 \bar{\lambda}_j \frac{\partial \bar{\lambda}_j}{\partial \xi_i} \right) \quad (5.31)$$

Donde la derivada de la esbeltez reducida de los elementos está gobernada por las siguientes expresiones:

- Si $\xi_i = b_j$:

$$\frac{\partial \bar{\lambda}_j}{\partial \xi_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{(2 b_j t_j - t_j^2) f_y}{N_{cr}} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{N_{cr}^2} \left(2 t_j f_y N_{cr} - \frac{\partial N_{cr}}{\partial \xi_i} (2 b_j t_j - t_j^2) f_y \right) \quad (5.32)$$

- Si $\xi_i = t_j$:

$$\frac{\partial \bar{\lambda}_j}{\partial \xi_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{(2 b_j t_j - t_j^2) f_y}{N_{cr}} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{N_{cr}^2} \left(2 (b_j - t_j) f_y N_{cr} - \frac{\partial N_{cr}}{\partial \xi_i} (2 b_j t_j - t_j^2) f_y \right) \quad (5.33)$$

- Si $\xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j$

$$\frac{\partial \bar{\lambda}_j}{\partial \xi_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{(2 b_j t_j - t_j^2) f_y}{N_{cr}} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{N_{cr}^2} \left(-\frac{\partial N_{cr}}{\partial \xi_i} (2 b_j t_j - t_j^2) f_y \right) \quad (5.34)$$

siendo la primera derivada del axil crítico de referencia la siguiente:

$$\frac{\partial N_{cr}}{\partial \xi_i} = \begin{cases} \frac{\pi^2 E}{l_j^4} \left(\frac{1}{4} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^2 l_j^2 - \frac{1}{6} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^3 t_j l_j \frac{\partial l_j(\xi)}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } \xi_i = b_j \\ \frac{\pi^2 E}{l_j^4} \left(\frac{1}{8} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^2 l_j^2 - \frac{1}{6} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^3 t_j l_j \frac{\partial l_j(\xi)}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } \xi_i = t_j \\ \frac{\pi^2 E}{l_j^4} \left(-\frac{1}{6} \left(b_j - \frac{t_j}{2} \right)^3 t_j l_j \frac{\partial l_j(\xi)}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.35)$$

Con todo ello, una vez definidas las expresiones que permiten obtener la primera derivada del coeficiente corrector χ_j se puede enunciar con mayor claridad la formulación implementada para el cálculo de la sensibilidad de las restricciones a compresión:

$$\frac{\partial g_{s,j}(\bar{\xi})}{\partial \xi_i} = \begin{cases} k \frac{\partial N_{d,j}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial \chi_j}{\partial \xi_i} (2 b_j t_j - t_j) t_j f_y - 2 \chi_j t_j^2 f_y & \text{si } \xi_i = b_j \\ k \frac{\partial N_{d,j}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial \chi_j}{\partial \xi_i} (2 b_j t_j - t_j) t_j f_y - 2 \chi_j (b_j - t_j) f_y & \text{si } \xi_i = t_j \\ k \frac{\partial N_{d,j}}{\partial \xi_i} - \frac{\partial \chi_j}{\partial \xi_i} (2 b_j t_j - t_j) t_j f_y & \text{si } \xi_i \neq b_j, \xi_i \neq t_j \end{cases} \quad (5.36)$$

5.5. Análisis de Sensibilidad de la Función Objetivo

De acuerdo con lo expuesto en el capítulo 4 epígrafe 4.2, la función objetivo del problema es el peso total de la estructura. En este sentido se ha considerado únicamente el peso de los elementos tipo barra que la componen, omitiendo la contribución de las uniones y otros herrajes, puesto que su incidencia estructural sobre los resultados no es significativa.

Con todo ello la expresión que gobierna el comportamiento de la función objetivo tal y como se expuso en el capítulo 4 es:

$$F(\xi) = \gamma_s \left(\sum_{j=1}^n l_j A_j \right) \quad (5.37)$$

De este modo aplicando la regla de la cadena se obtiene la expresión que de modo genérico caracteriza la primera derivada de la función respecto a las variables de diseño del problema:

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{\xi})}{\partial \xi_i} = \gamma_s \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} A_j + l_j \frac{\partial A_j}{\partial \xi_i} \right) \quad (5.38)$$

Atendiendo particularmente a las variables principales del problema se obtienen las siguientes expresiones para el análisis de sensibilidad de primer orden:

$$\frac{\partial F(\boldsymbol{\xi})}{\partial \xi_i} = \begin{cases} \gamma_s \left(\sum_{j=1}^n l_j \frac{\partial A_j}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } \xi_i = b_j \\ \gamma_s \left(\sum_{j=1}^n l_j \frac{\partial A_j}{\partial \xi_i} \right) & \text{si } \xi_i = t_j \\ \gamma_s \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial l_j}{\partial \xi_i} A_j \right) & \text{si } \xi_i = x_{k,s,t} \Leftrightarrow j \in t \\ 0 & \text{si } \xi_i = x_{k,s,t} \Leftrightarrow j \notin t \end{cases} \quad (5.39)$$

5.6. Resumen

De forma sintética, el análisis de sensibilidad recoge el conjunto de técnicas que permiten realizar la aproximación de una función mediante un desarrollo en serie de Taylor. De este modo, conforme se considere un mayor número de términos en el desarrollo de Taylor, se incrementa el orden de la aproximación. Esta técnica permite la evaluación de una función con un coste computacional relativamente bajo. Dado que el algoritmo en el que se basa la metodología propuesta en este documento posee una naturaleza estocástica basada en una multitud de pruebas, se ha considerado la implementación de un análisis de sensibilidad de primer orden que acelere el procedimiento y permita reducir el tiempo total de computación. En el presente capítulo se ha expuesto la formulación seguida para el análisis de sensibilidad dentro del marco de la tesis doctoral que se expone. En los siguientes capítulos se tratarán los detalles de la metodología seguida, exponiendo tanto sus características como el funcionamiento del mismo.

“En la Investigación es incluso más importante el proceso que el logro mismo.” Emilio Muñoz Ruiz
(Científico español. Valencia 1937)

Capítulo 6

Metodología y Algoritmo Empleado

6.1. Introducción

En el presente capítulo se expone en profundidad la metodología propuesta en la presente tesis para la optimización de estructuras de transporte de energía. En este sentido la presente tesis doctoral pretende elaborar una metodología novedosa que permita la resolución de problemas reales de ingeniería aglutinando variables de diferente naturaleza, con un coste computacional razonable. De acuerdo con los capítulos anteriores el problema estructural se encara a través de un modelo tridimensional completo de nudos articulados considerando hasta 10 hipótesis de carga de forma simultánea. De este modo con el objeto minimizar el peso total de la estructura se planteará un algoritmo basado en técnicas de optimización estocástica que permiten el tratamiento conjunto de variables continuas y discretas.

En un primer lugar se describirá la metodología general aplicada y posteriormente se llevará a cabo un estudio específico de las características del algoritmo de “recocido simulado” empleado.

6.2. Esquema General del Algoritmo

En la presente tesis doctoral se encara el estudio de la optimización de estructuras de transporte de energía a través de técnicas de optimización estocástica tal y como se justificó en el capítulo 4, epígrafe 4.5.5. Más concretamente la técnica de optimización implementada es la del “simulated annealing”, o “recocido simulado” en la literatura de habla hispana, diseñada específicamente para el tratamiento de variables discretas, y basada en la prueba de diversas configuraciones aleatorias del sistema. En la Figura 6.1, se adjunta un esquema de la metodología general desarrollada para la resolución del problema estudiado.

El algoritmo propuesto se basa en un esquema iterativo iniciado con el cálculo estructural de la torre y seguido del análisis de sensibilidad de primer orden, incorporado en la metodología propuesta para mejorar el coste computacional del procedimiento. Una vez obtenidos los parámetros que permiten aproximar el funcionamiento de las restricciones y la función objetivo mediante desarrollos en serie de Taylor, el algoritmo entra en el módulo de decisión, en el que la metodología propuesta obtiene la dirección de avance. Para ello se han considerado dos alternativas diferentes, una primera basada en la dirección de máximo descenso y una segunda basada, tal y como se expuso anteriormente, en el algoritmo del “recocido simulado”. La elección de cada una de las metodologías depende de la existencia de restricciones activas, de forma que se empleará el primero de los métodos siempre y cuando el diseño de la estructura no active ninguna.

Dentro del “recocido simulado” el algoritmo ejecuta una serie de pruebas para obtener la dirección de modificación de las variables. En el caso de que el número de pruebas realizadas sea excesivo y todavía no se haya obtenido una dirección de modificación, el procedimiento desarrollado reinicia el “recocido” reactualizando la temperatura e incrementando la región de exploración de las variables. De este modo, el entorno estudiado incorpora configuraciones que suponen una mayor modificación respecto al estado estudiado.

Por otro lado, para permitir el correcto funcionamiento del método, el procedimiento propuesto incorpora módulos de compatibilización que posibilitan el tratamiento conjunto de variables continuas y discretas. De este modo, el algoritmo es capaz de asumir la diferente sensibilidad que poseen tanto la función objetivo como las restricciones respecto a las diversas variables que confluyen en el problema. Una vez el algoritmo obtiene una dirección de modificación aceptable, se reinicia el procedimiento con una nueva iteración.

Finalmente, el algoritmo incorpora criterios de detención basados en la temperatura de congelación y en un excesivo número de iteraciones en las que no se alcanza una mejora de la solución. De este modo se consigue controlar la parada del método de manera simple y eficaz.

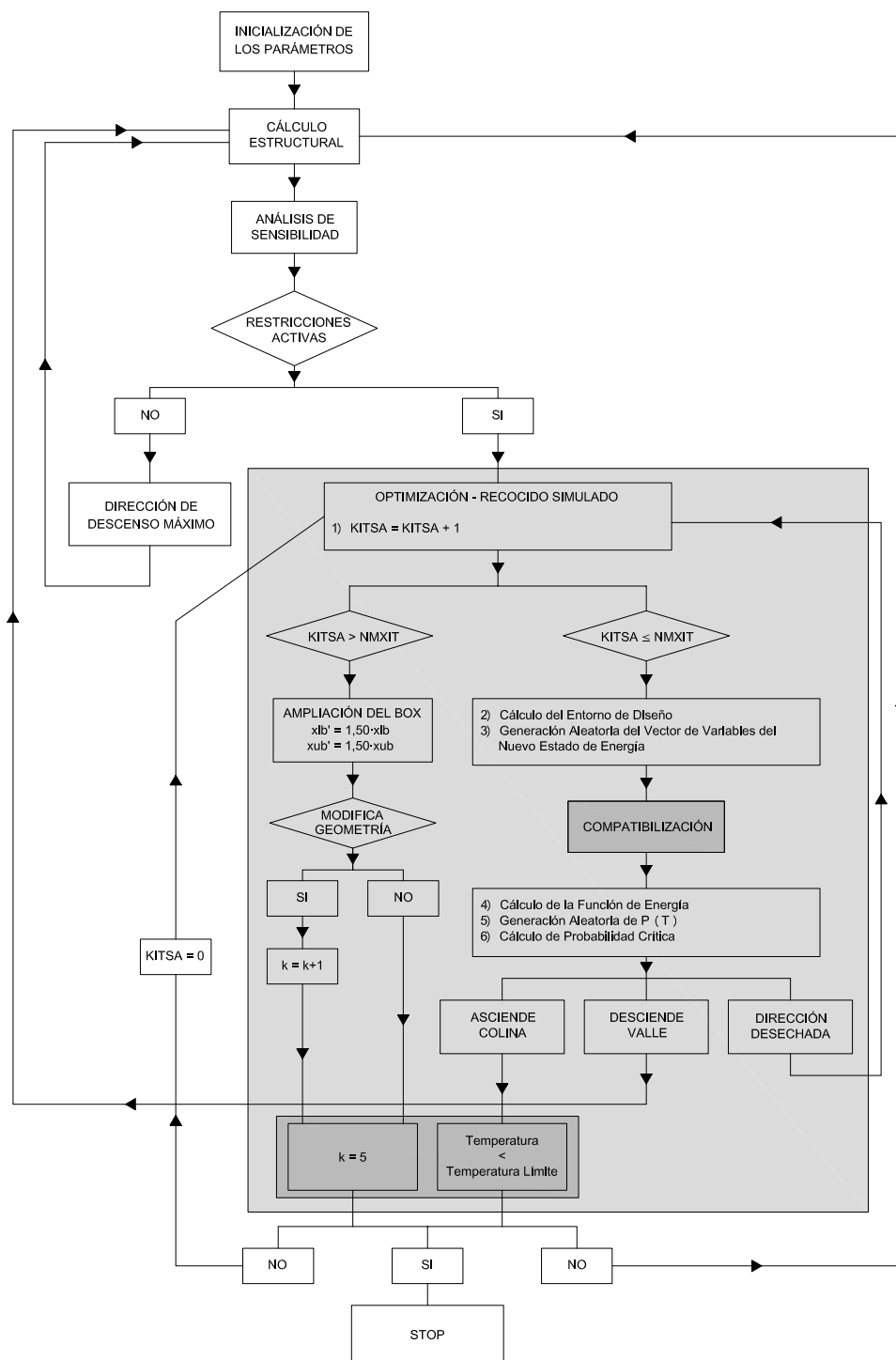


Figura 6.1: Esquema General de la Metodología Implementada.

A lo largo del presente capítulo se procederá a un estudio pormenorizado de todas aquellas particularidades que caracterizan el esquema general implementado, haciendo especial hincapié en los aspectos más novedosos.

6.3. Análisis de Sensibilidad y Entorno Factible

Como puede comprobarse en el esquema adjunto, Figura 6.1, dado que el “recocido simulado” es un procedimiento basado en un elevado número de pruebas, se ha introducido un análisis de sensibilidad que permita predecir el comportamiento tanto de la función objetivo como de las restricciones que caracterizan el problema, bajo un reducido coste computacional. De este modo se consigue una aproximación en desarrollo en serie de Taylor, evitando un recálculo estructural de la torre y sustituyéndolo por una sencilla evaluación polinómica. Mayores detalles sobre el Análisis de Sensibilidad implementado en la presente tesis se pueden consultar en el capítulo 5.

Dado que las restricciones y la propia función objetivo son funciones no lineales, la aproximación obtenida a través del Desarrollo en Serie de Taylor de primer orden presenta un cierto error. Este hecho motiva que los avances en las variables deban restringirse con el objeto de limitar los errores en la aproximación que puedan desvirtuar el resultado. En este sentido la evolución de las variables continuas se realiza a partir de límites móviles, equivalentes al 1 % del rango total de la variable.

Por otro lado, las variables discretas incorporan una complejidad mayor, puesto que a pesar de considerar dos variables de este tipo, ancho de ala y espesor, realmente están relacionadas unívocamente. Es por ello que teóricamente existe una única variable discreta, que en la práctica se descompone en dos variables independientes que la caracterizan. De este modo, y a nivel conceptual, se puede asociar dicha variable o entidad discreta global como una función binaria definida a partir de dos variables independientes:

$$P_L(b', t') = \begin{cases} 1 & \text{si } (b', t') \in \text{Dom}(P_L) \\ 0 & \text{si } (b', t') \notin \text{Dom}(P_L) \end{cases} \quad (6.1)$$

En cualquier caso, de acuerdo al esquema recogido en la Figura 6.1, el *box* o región de estudio de la variable sufre ciertas modificaciones en función de si el algoritmo de “recocido simulado” alcanza un número de iteraciones lo suficientemente elevado sin haber obtenido ninguna dirección de avance razonable. De este modo, asumiendo un número máximo de iteraciones dentro del recocido simulado (*nmxit*) igual a 10000 pruebas, se obtiene una probabilidad límite de encontrar una solución factible considerando el 0.1 % de las direcciones posibles como potencialmente aceptables, de $4.5 \cdot 10^{-5}$.

$$(1.000 - 0.001)^{nmxit} \leq 0.000045 \Rightarrow nmxit \geq [\log_{0.999} 0.000045] \simeq 10000 \quad (6.2)$$

Con todo ello, una vez definido el comportamiento real de las variables de diseño, se puede caracterizar un entorno de la variable global discreta definiéndolo a partir de aquellas parejas de anchura - espesor contiguas:

$$E_{(b_k, t_k)} = (b_j, t_l) \quad / \quad j, l \in \mathbb{Z}[k-i, k+i] / P_L(b_j, t_l) = 1 \quad (6.3)$$

donde i , indica el cardinal de la iteración consecutiva en la que el “recocido simulado” no ha encontrado ninguna dirección factible de búsqueda. Con todo ello se obtiene un mapeado de la variable tal y como se expone en las Figuras 6.2 y 6.3:

t	ANCHO DE ALA b (mm)																	
(mm)	b ₁	b ₂	...	b _{k-5}	b _{k-4}	b _{k-3}	b _{k-2}	b _{k-1}	b _k	b _{k+1}	b _{k+2}	b _{k+3}	b _{k+4}	b _{k+5}	...	b _{n-1}	b _n	
t ₁	X	X																
t ₂				X														
...																		
t _{k-6}						X	X	X	X									
t _{k-5}								X										
t _{k-4}								X	X									
t _{k-3}								X			X							
t _{k-2}									X	X	X							
t _{k-1}								X		X	X	X						
t _k									X	X	X	X						
t _{k+1}										X	X	X						
t _{k+2}									X		X	X						
t _{k+3}											X	X	X					
t _{k+4}											X	X		X				
t _{k+5}												X		X				
t _{k+6}												X		X				
...																		
t _{n-1}																X		
t _n																	X	

Figura 6.2: Determinación del entorno para las variables discretas.



Entorno Discreto para la quinta iteración consecutiva superando NMxit
Entorno Discreto para la cuarta iteración consecutiva superando NMxit
Entorno Discreto para la tercera iteración consecutiva superando NMxit
Entorno Discreto para la segunda iteración consecutiva superando NMxit
Entorno Discreto para la primera iteración consecutiva superando NMxit

Figura 6.3: Codificación empleada en la Figura 6.2.

Finalmente la obtención numérica de dicho entorno aleatorio se realiza a partir de la generación estocástica de un valor comprendido entre -1.00 y 1.00, que en el caso de las variables continuas multiplica directamente la anchura definida por los límites móviles. Para el caso de las variables discretas la obtención del valor de cada una de las variables independientes se obtiene a partir de un reparto estadístico uniforme, de la siguiente forma:

$$x \in \left(-1.00 + l \frac{2}{2m+1}, -1.00 + (l+1) \frac{2}{2m+1} \right) \Rightarrow j = k - i + l \quad (6.4)$$

con $m = 1, \dots, i$ y $l = 0, \dots, 2i$

6.4. Dirección de Máximo Descenso

El esquema del algoritmo presentado en la Figura 6.1, posee dos líneas de avance en el proceso de optimización. Una línea principal que se basa en la implementación del recocido simulado y una segunda basada en la implementación de un algoritmo de dirección de máximo descenso. Este tipo de algoritmo identifica la dirección de avance del problema con la dirección perpendicular a las isolíneas de la función objetivo en el punto. De este modo tal y como, expone Navarrina [63] en su tesis la dirección de avance se define como la opuesta al gradiente de la función objetivo:

$$\mathbf{s}_k = - \left. \frac{\partial \mathbf{f}(\xi)}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_k} \quad (6.5)$$

Este método se activa siempre y cuando la solución de partida esté lo suficientemente holgada como para que el avance no genere transgresiones significativas de las restricciones. Es por ello que en el marco del presente algoritmo sólo se aplica si el sistema es incapaz de generar un aprovechamiento superior al 90 % en al menos una de las restricciones.

Por otro lado dicha metodología puede llegar a generar problemas de convergencia cuando la curvatura de la función objetivo es muy acusada o bien cuando se está muy próximo a un óptimo del problema. Es por ello que para evitar posibles malfuncionamientos de esta rama del algoritmo se permite que se ejecute el recocido simulado a pesar de que no lleguen a activarse las restricciones del problema, siempre y cuando se hayan ejecutado de forma consecutiva hasta 10 veces la dirección del algoritmo de máximo descenso.

6.5. Simulated Annealing o Recocido Simulado

Tal y como se expuso en el capítulo 4, el algoritmo del simulated annealing, o recocido simulado en la literatura de habla hispana, fue desarrollada inicialmente por Kirkpatrick en

1983 [38] por analogía con el recocido o temple de los materiales metálicos, basándose en la teoría de Metropolis [54].

6.5.1. Analogía con el Templado de los Metales

Metropolis y su equipo desarrollaron en 1953 una metodología capaz de simular la disipación térmica de un material. Al mismo tiempo el método permitía identificar la evolución de las configuraciones de los cristales de un sólido metálico, a través de un modelo estocástico de simulación de las transiciones entre diversas configuraciones energéticas de sus átomos. El algoritmo propuesto tiene su origen físico - químico en que en una sustancia cualquiera las moléculas que la componen se encuentran distribuidas en distintos niveles energéticos de acuerdo a una distribución tipo Boltzman.

El estado energético posible en la materia y al que se tiende de modo natural durante cualquier proceso de enfriamiento lo suficientemente lento y controlado se denomina “Estado o Configuración Fundamental”. En este sentido cuando una sustancia se encuentra a 0° K todas sus partículas se encuentran distribuidas en dicho estado fundamental y conforme se incrementa la temperatura aumenta el número de moléculas que abandonan dicho estado.

Con todo ello, la evolución de la configuración cristalina de un sólido metálico derivada de un proceso de enfriamiento o de reducción de su temperatura consiste, a grandes rasgos, en una búsqueda de la matriz cristalina de menor energía interna. En este sentido lo que se pretende es el cálculo de la distribución de partículas que minimice la energía interna del conjunto.

De esta forma puede establecerse una analogía entre el problema de optimización y el proceso de enfriamiento, correlacionando la energía interna del conjunto con la función objetivo del problema de optimización. En la tabla 6.1 se indican las correspondencias y equivalencias existentes.

Termodinámica	Optimización
Configuración	Solución Factible
Configuración Fundamental	Solución Óptima
Energía de la Configuración	Función Objetivo
Temperatura	Estado de la Optimización

Tabla 6.1: Analogía entre la termodinámica y la optimización.

6.5.2. El Algoritmo de Metropolis

En un problema físico real para una temperatura determinada y tal y como se expuso en el epígrafe anterior, las partículas se distribuyen de acuerdo con una distribución de Boltzmann. De este modo el algoritmo de Metropolis se fundamenta en una serie evolutiva de configuraciones energéticas, de forma que el movimiento o transición de las moléculas de un estado a otro será aceptado si y sólo si la energía disminuye, o bien si la modificación está asociada a una probabilidad proporcional al factor de Boltzmann.

Aplicando la analogía anteriormente expuesta, una perturbación sobre el estado inicial del sistema resultará aceptada directamente si la nueva solución supone una reducción de la función objetivo, o bien si se le asocia una probabilidad proporcional al factor de Boltzmann. Con ello el algoritmo evita estacionarse en óptimos locales, ya que permite el paso a soluciones peores con una probabilidad que se reduce a medida que la solución se aproxima al óptimo.

Por otro lado para evitar el cálculo de la energía interna media de cada uno de los estados a través de costosos métodos de integración, el autor propuso el empleo del método de Monte Carlo para estimar la distribución energética de cada una de las configuraciones vecinas a una dada. De este modo Metropolis enuncia una estrategia de muestreo basada en dos principios básicos:

- La configuración energética de un instante $t+1$, pertenece a un entorno lo suficientemente cercano de su predecesora.

$$C_{t+1} = E(C_t) \quad (6.6)$$

- Las diversas configuraciones vecinas, situadas en el entorno del instante t , son aceptadas con una probabilidad límite dada por la expresión:

$$q = \min \left\{ 1, \frac{P(C_{t+1})}{P(C_t)} \right\} \quad (6.7)$$

y que se mantiene constante durante todo el proceso.

Para la estimación de la probabilidad de transición entre sucesos, Metropolis proponía el empleo de la Energía Interna de los colectivos atómicos del sólido de acuerdo a lo enunciado por Gibbs en el siglo XIX. De este modo el criterio de aceptación se establece como:

$$q = \min \left\{ 1, e^{-\Delta E/kT} \right\} \quad (6.8)$$

siendo: ΔE la variación energética entre las configuraciones consideradas en cada iteración, T la temperatura del sistema en el estado considerado y k la constante térmica de Boltzman.

6.5.3. El Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo nace a raíz de los estudios sobre hidrodinámica de partículas llevados a cabo por John Von Neumann y Stanislaw Ulam para el desarrollo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial en el Laboratorio Nacional de los Álamos en EEUU. No obstante no sería hasta 1948 con los trabajos de Kahn y Herman cuando la teoría experimentase un desarrollo sistemático.

Este algoritmo permite la evaluación de expresiones matemáticas de gran complejidad a través de técnicas de muestreo o exploración probabilística de su dominio. De este modo a través de un número lo suficientemente elevado de pruebas aleatorias se puede obtener un ajuste a la solución con una tolerancia o grado de confianza aceptable.

Un ejemplo clásico empleado para la ilustración del método es el de la estimación valor de la constante π a través de la generación aleatoria de puntos. Considerando un dominio bidimensional con geometría cuadrangular, en el que se inscribe una circunferencia, la relación entre el área del cuadrado y de la citada circunferencia es $\pi/4$ (Figura 6.4).

$$\left. \begin{array}{l} A_{\text{cuadrado}} = l^2 \\ A_{\text{circunferencia}} = \frac{\pi}{4} l^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{A_{\text{circunferencia}}}{A_{\text{cuadrado}}} = \frac{\pi}{4} \quad (6.9)$$

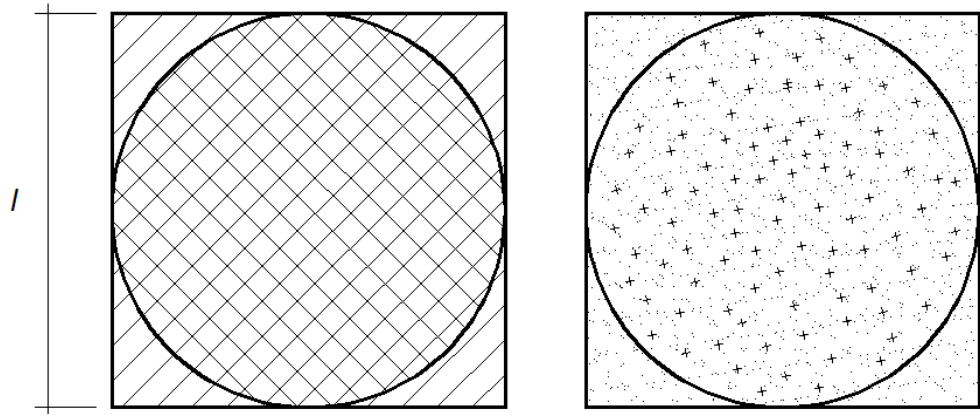


Figura 6.4: Ilustración del problema de estimación de π por el método de Monte Carlo.

De este modo simulando un número lo suficientemente elevado de puntos aleatorios del dominio, la relación existente entre el número de ellos caídos en el interior de la circunferencia con el total corresponde con $\pi/4$. A partir de este concepto el método permite desde la

estimación de parámetros de distribuciones probabilísticas hasta la resolución de problemas de integración.

6.5.4. Metodología Implementada

El “recocido simulado” se basa en la generación aleatoria de estados pertenecientes a un entorno lo suficientemente cercano a la solución inicial en los que estudiar el comportamiento “termodinámico” de la función. Para ello se escogen aleatoriamente puntos del entorno, y se estudia el valor que toma la energía interna del sistema en ellos, de modo que:

- Si la energía disminuye el nuevo punto se acepta.
- Si la energía aumenta, se comprueba si el nuevo estado se ajusta a una distribución tipo Gibbs, generando un valor aleatorio comprendido entre 0 y 1 y verificando si es menor que el valor de probabilidad que dicha distribución proporcionaría para la temperatura estudiada.

De este modo existen tres posibilidades a la hora de evaluar cada uno de los puntos generados aleatoriamente en el proceso de optimización:

- Descenso de Valle: la nueva solución posibilita un descenso de la energía interna.
- Ascenso de Colina: la solución supone un incremento de la energía interna acorde con la función de Gibbs, por lo que el algoritmo la asume como factible.
- Dirección Rechazada: la nueva posición supone un incremento de la función de la energía interna que no se ajusta a los límites establecidos por la distribución de Gibbs.

En el caso de que el recocido simulado rechace una dirección de avance, se procede al reinicio del algoritmo, así hasta alcanzar una solución factible o superar el número máximo de iteraciones. En esta última situación, la metodología desarrollada en la presente tesis doctoral, reinicia el proceso incrementando el rango admisible de los límites móviles de las variables, esto es, el entorno de estudio de las variables de diseño.

6.5.5. La Función de Energía

La función de energía refleja el estado del sistema en un instante dado del proceso de optimización, aportando la información necesaria sobre la función objetivo. No obstante, la evolución del algoritmo no sólo está marcada por el propio valor de la función objetivo,

sino que las propias restricciones que condicionan el problema completan la información necesaria para establecer la convergencia y la optimización.

Con todo ello, en la presente tesis doctoral se propone el empleo de funciones de penalización compuestas a partir de la adimensionalización de la función objetivo y de las restricciones que intervengan en el algoritmo.

$$F(\xi) = f(\xi) + G(\xi) \quad (6.10)$$

La función $G(\xi)$ dentro de la expresión de la energía representa la función de penalización que introduce la información necesaria sobre las restricciones del problema. De acuerdo a Hernández [30], existen dos grandes tipos de funciones de penalidad:

- Funciones de Penalización Exterior: se parte de una solución inicial que no tiene porqué verificar la totalidad de las restricciones del problema, generando una secuencia de valores que tiende a redirigir el estado del sistema a la región factible a la par que optimiza la solución (Figura 6.6).

$$G^\gamma(\xi) = \beta \sum_{j=1}^n g_j^\gamma(\xi) \quad (6.11)$$

- Funciones de Penalización Interior: en las que obligatoriamente se parte de una solución factible del problema a partir de la cual se optimiza la solución, generando una secuencia de estados pertenecientes a la región factible (Figura 6.5).

$$G^\gamma(\xi) = -\beta \sum_{j=1}^n \frac{1}{g_j^\gamma(\xi)} \quad (6.12)$$

Dado que es previsible que durante el proceso de optimización se produzcan leves transgresiones en las restricciones, debido a la incertidumbre generada por la aplicación del análisis de sensibilidad, se han adoptado funciones similares a las de penalidad exterior. El coeficiente β es un coeficiente empírico que proporciona un escalado de las restricciones respecto al valor de la función objetivo. En este sentido cuanto mayor sea el valor de dicho coeficiente más se incrementa el peso de las restricciones en el proceso de optimización, por lo que un incremento excesivo puede provocar que el algoritmo tienda a estados en los que se verifiquen fuertemente todas las restricciones. Este hecho altera significativamente el funcionamiento del algoritmo, perturbando los resultados obtenidos.

En cualquier caso dicho coeficiente se ha calibrado de forma que la información relativa a las restricciones del problema no altere la búsqueda del valor óptimo de la función objetivo.

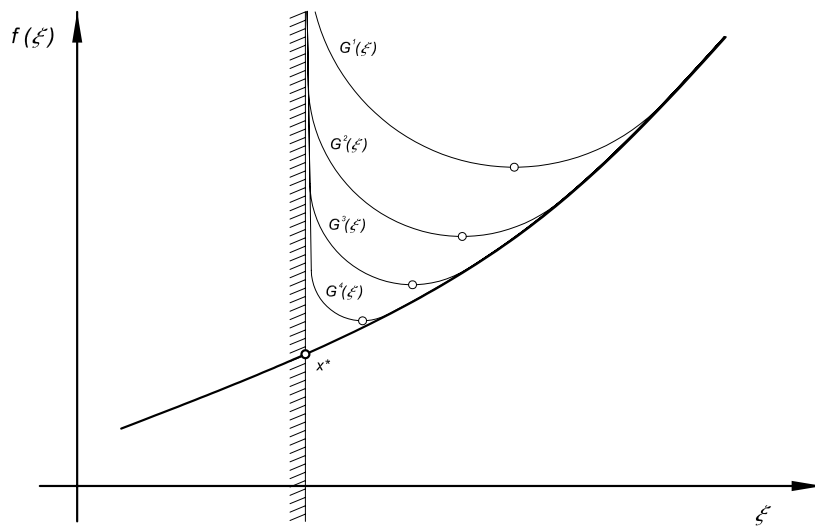


Figura 6.5: Evolución de las funciones de penalización interior, en función del coeficiente [63].

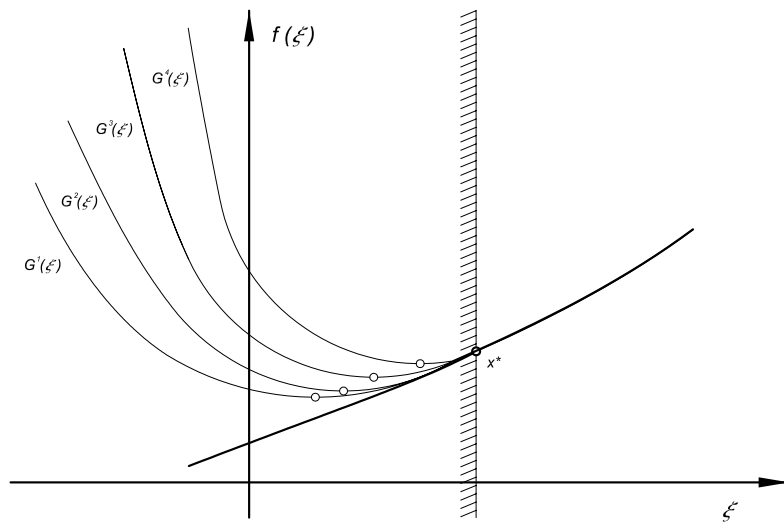


Figura 6.6: Evolución de las funciones de penalización exterior, en función del coeficiente [63].

De este modo y tras estudiar el comportamiento del algoritmo para diferentes valores de β , se ha optado por considerar como aceptable que la incidencia de las restricciones no debe exceder en 1 % del total de la función objetivo. Por otro lado el coeficiente γ debe ser positivo, proponiéndose como referencia $\gamma = 3$.

Finalmente para permitir que tanto la función objetivo como las restricciones sean

comparables, y por tanto sea posible su integración en una única función de energía, se recurre nuevamente a la analogía física del algoritmo. En todo problema físico para que una expresión tenga sentido, debe ser consistente y dimensionalmente coherente.

Por otro lado, dada la diferente naturaleza de las restricciones condicionantes del problema, así como la disparidad dimensional con la función objetivo y con las propias restricciones entre sí, resulta razonable que la información suministrada por la función de energía deba ser adimensionalizada. De este modo se garantiza la independencia del algoritmo de las unidades que caractericen el problema y se consigue la consistencia de la información suministrada.

Para conseguir el objetivo de la adimensionalidad se plantea, para el caso de las restricciones, el valor del aprovechamiento, concepto explicado en profundidad en el capítulo 4 de la presente tesis doctoral. En cualquier caso las restricciones empleadas serán aquellas consideradas activas o que superen el 90 % de aprovechamiento, debiéndose además controlar su evolución.

Sin embargo para conseguir la adimensionalización de la función objetivo, se considera la relación entre el estado actual y el valor de dicha función en el estado inicial del proceso. De este modo se obtiene una relación en tanto por uno respecto al valor de partida del proceso de optimización.

Con todo ello la función de energía queda gobernada por la siguiente expresión:

$$F(\xi) = \frac{f_k(\xi)}{f_0(\xi)} - \frac{\beta}{n} \sum_{j=1}^n a_j^3(\xi) \quad (6.13)$$

En donde $f_0(\xi)$ representa el valor de la función objetivo al inicio del proceso de optimización, $f_k(\xi)$ el valor de la función objetivo en el instante k , $a_j(\xi)$ el aprovechamiento de la función, en el instante k y β el coeficiente de ponderación de las restricciones.

6.5.6. Compatibilización de Variables Discretas y Continuas (Suavizado)

Dado que las variables concurrentes en el problema son tanto de carácter continuo como discreto, la definición de dicho entorno de estudio condiciona en gran medida el comportamiento de la función objetivo. En este sentido a pesar de que los incrementos de las variables discretas pueden llegar a ser similares a los incrementos en las variables continuas, los saltos que generan en la función objetivo son muy diferentes. Esto se debe a que la función objetivo es especialmente sensible a las modificaciones en espesor y ancho de ala. Este hecho queda patente al estudiar las expresiones del análisis de sensibilidad de la función objetivo presentadas en el capítulo 4. En ellas se observa como la función objetivo presenta

un comportamiento marcadamente lineal respecto a las variables discretas, mientras que para las variables geométricas está supeditada a la variación que generen sobre la longitud.

Para que el proceso de optimización proporcione buenos resultados, es imprescindible que las modificaciones de las variables de diseño sean comparables. Con este objetivo se ha procedido a mitigar la descompensación entre variables permitiendo al programa que estudie el comportamiento del sistema al modificar de forma independiente las variables geométricas, seccionales o bien ambas en conjunto, a través de una elección aleatoria. En la presente tesis, este proceso recibe el nombre de Compatibilización (ver esquema de la Figura 6.1), y se incorpora dentro del recocido simulado entre la fase inicial, en la que se obtiene el entorno factible, y la fase de decisión, en la que se verifica que la solución escogida es viable (ascenso de colina o descenso de valle) o bien resulta rechazada (Figura 6.7).

Tal y como se puede comprobar en la citada figura, para evitar que el algoritmo modifique únicamente las secciones o la geometría condicionando el resultado, el método propuesto está diseñado de forma que durante las primeras pruebas de cada iteración modifique todas las variables de forma conjunta (si $jcont < ncont$). Si el algoritmo es incapaz de encontrar una dirección viable a lo largo de dichas pruebas entonces el método permite la elección aleatoria.

Paralelamente, si el algoritmo no consigue encontrar una dirección factible en las 6 primeras pruebas en las que se modifiquen secciones, el método activa el proceso de *suavizado seccional*. Conforme el algoritmo se aproxima al punto óptimo, y debido al carácter discreto de las variables seccionales, existirá un elevado número de variables de este tipo que se encuentren en el valor del resultado. En este sentido debido al excesivo número de variables discretas que intervienen en el algoritmo, resulta muy poco probable que en la generación aleatoria del vector solución, únicamente resulte modificada una variable. Es por ello, que la metodología propuesta incluye un procedimiento complementario, *suavizado seccional*, en el que se modifica únicamente y de forma aleatoria una de las variables seccionales del problema. De este modo se consigue suavizar la geometría de la torre homogeneizando los incrementos de la función objetivo y permitiendo una exploración más exhaustiva del dominio de las variables geométricas, que dado su carácter continuo es teóricamente infinito.

6.5.7. Convergencia del Algoritmo de Recocido Simulado

Los métodos tradicionales para la resolución de problemas de optimización discreta, pasan por la consideración de soluciones iniciales arbitrarias a partir de las cuales se plantean diferentes metodologías que permiten obtener el resultado basándose en sucesivas mejoras de la función objetivo. Este hecho hace que los métodos tradicionales presenten dos grandes

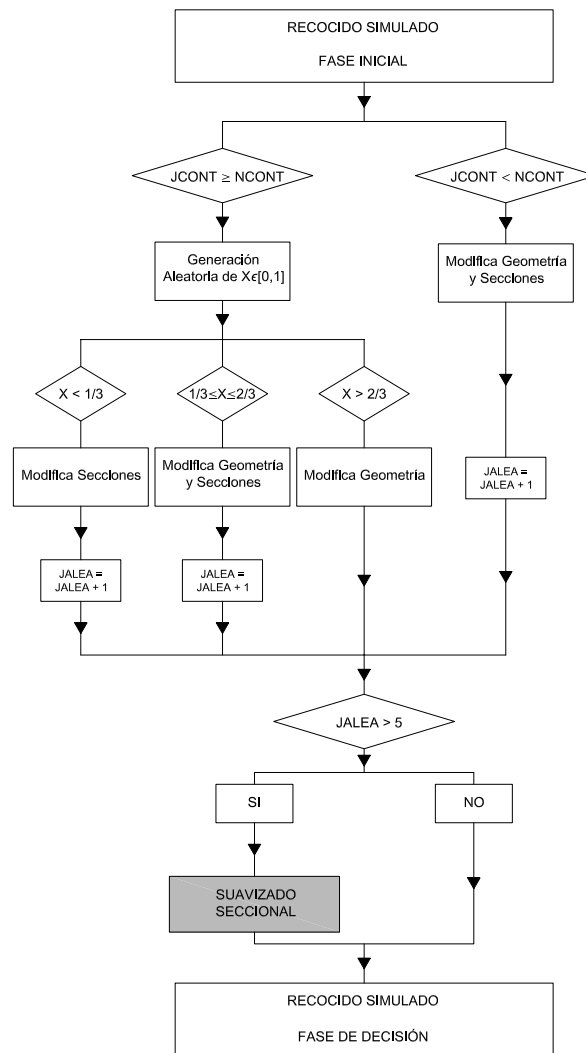


Figura 6.7: Esquema del algoritmo de compatibilización implementado

problemas:

- La solución final está claramente condicionada por la solución inicial escogida.
- Los métodos tienden a converger a un mínimo local, no pudiéndose garantizar la convergencia hacia el mínimo global de los mismos.

El Recocido Simulado modifica el enfoque de los métodos tradicionales para solucionar estos problemas, permitiendo posibles empeoramientos de la función objetivo siempre y cuando redunden en una mejoría final de la solución. Muchos han sido los autores que han tratado y estudiado en profundidad la convergencia de este tipo de procesos estocásticos.

En particular los estudios de Gidas [25], Geman y Geman [24] o Cruz y Dorea [18], analizan especialmente las diferentes características o condiciones que deben reunir este tipo de procesos estocásticos para garantizar su convergencia.

El método genera un proceso estocástico que cumple con las características de una cadena de Markov. En este sentido se dice que una serie de sucesos aleatorios verifica las propiedades markovianas si y solo si la probabilidad de un suceso futuro dado el estado actual es independiente de la serie de sucesos pasados [31]. Aplicando dicha definición a la metodología expuesta por Metropolis, y siendo k_j la configuración energética en el instante j y X_j el suceso aleatorio en el instante j , se obtiene:

$$P(X_{t+1} = k_{t+1} | X_0 = k_0, X_1 = k_1, \dots, X_{t-1} = k_{t-1}, X_t = k_t) = P(X_{t+1} = k_{t+1} | X_t = k_t) \quad (6.14)$$

En este sentido se dice que una serie de sucesos estocásticos es convergente si la probabilidad estacionaria de la serie tiende a 1.00, es decir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(X_t = k_t | X_0 = k_0) = 1.00 \quad (6.15)$$

Tal y como exponen Anily y Federgruen [3], y atendiendo a la formulación anteriormente expuesta, el algoritmo varía las probabilidades de transición conforme avanza el proceso de optimización. De este modo la cadena de Markov resultante del algoritmo es noestacionaria, hecho que a priori puede considerarse como un inconveniente ya que dificulta en gran medida la predicción de su comportamiento.

No obstante, Gidas [25] consiguió demostrar la convergencia del algoritmo hacia el mínimo global basándose en las propiedades derivadas de la ergodicidad de la cadena de Markov resultante, siempre y cuando la velocidad de enfriamiento del algoritmo sea suficientemente lenta. Gidas pretendía obtener el esquema de enfriamiento más adecuado que permitiese alcanzar el óptimo global con un coste computacional razonable. Para ello debía luchar en contra de dos procesos contrapuestos:

- Enfriamiento Adiabático: Dicho fenómeno sucede cuando el esquema es demasiado rápido y provoca que el sistema alcance un estado isentrópico en torno a un mínimo local.
- Sobrefusión: En este proceso la temperatura se reduce tan lentamente que el propio algoritmo llega al óptimo global pero no se detiene, oscilando consecutivamente e incluso llegando incluso a detenerse en una solución peor.

Finalmente la velocidad de enfriamiento necesaria para asegurar la convergencia debería cumplir:

$$T_k = \frac{C}{\log\left(\frac{k}{t_0}\right)} \quad (6.16)$$

No obstante la aplicación práctica posterior del algoritmo demuestra que el empleo de otro tipo de esquemas proporciona del mismo modo buenos resultados. Del mismo modo, se ha podido comprobar cómo el excesivo coste computacional que exige impide su aplicación a problemas reales de ingeniería estructural. A continuación se tratarán con mayor detalle las particularidades del algoritmo derivadas de los procesos de enfriamiento.

6.5.8. Esquemas de Enfriamiento

De acuerdo a lo expuesto en los epígrafes anteriores la temperatura es el parámetro fundamental que controla y gestiona la evolución del método. En este sentido la temperatura gobierna no sólo el número de pruebas o la longitud del proceso evolutivo, sino que condiciona las probabilidades de transición de un estado a otro de energía.

Por lo tanto el algoritmo presenta en la temperatura un grado de libertad que puede llegar a condicionar su convergencia, siendo necesario un estudio y caracterización detallada del proceso de enfriamiento para garantizar su correcto funcionamiento. En los siguientes epígrafes se estudiarán con mayor detalle los aspectos principales que caracterizan y definen el sistema de enfriamiento empleado.

6.5.8.1. Temperatura Inicial

Una de las características fundamentales que debe cumplir todo algoritmo que pretenda cierta generalidad es que resulte independiente de la solución o estado inicial de partida. Tal y como se ha comprobado en el epígrafe 6.5.7, el algoritmo desarrolla una cadena de Markov no estacionaria en la que las probabilidades de transición entre estados varían con la temperatura. En este sentido, partir de valores diferentes puede llegar a condicionar las probabilidades de transición entre estados lo suficiente como para alterar el resultado.

Tradicionalmente la forma de solucionar este problema pasa por adoptar valores de temperatura inicial lo suficientemente altos como para conseguir que el método se estabilice antes de comenzar el descenso hacia el óptimo. De lo que se desprende del artículo publicado por White en 1984 [84], el algoritmo adopta un comportamiento asintótico inicial, experimentando un fuerte descenso de la función objetivo a partir de un valor de temperatura que de ahora en adelante denominaremos crítica (Figura 6.8).

Empíricamente se ha comprobado que considerar como punto de partida del algoritmo

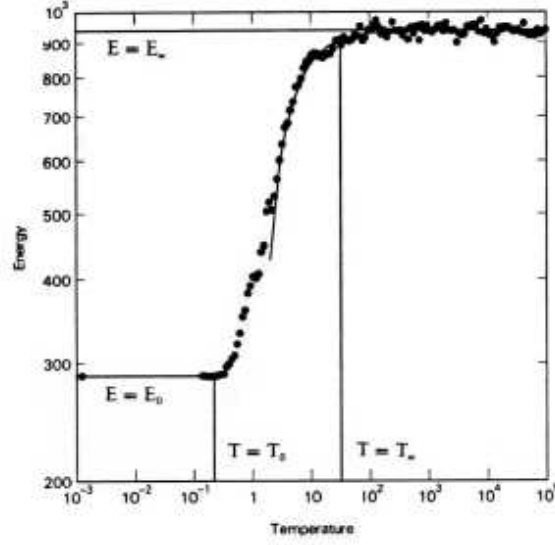


Figura 6.8: Figura original de White, en la que se muestra la evolución de la energía frente a la temperatura.

temperaturas inferiores a la crítica, de acuerdo a lo expuesto por White [84], supone malfuncionamientos del algoritmo. Este hecho se debe a que la probabilidad de aceptación de los movimientos de ascenso de colina no es lo suficientemente elevada como para permitir una correcta exploración del entorno del punto inicial. No obstante, emplear temperaturas iniciales elevadas incrementa considerablemente el tiempo de computación, hecho que penaliza el funcionamiento del algoritmo.

Por otro lado Lundi y Mees [46], en un estudio previo al realizado por White, enunciaban que el algoritmo debería comenzar por una temperatura lo suficientemente elevada como para que la probabilidad de aceptación de ascenso de colina sea prácticamente la unidad. De este modo proponían un valor de temperatura inicial equivalente a un límite superior de la diferencia de energía entre estados adyacentes:

$$P_{ij} = e^{\frac{-(F_j(\xi) - F_i(\xi))}{T_0}} \cong 1.00 \Rightarrow \frac{-(F_j(\xi) - F_i(\xi))}{T_0} \cong 0.00 \Rightarrow T_0 = \max(F_j(\xi) - F_i(\xi)) \quad (6.17)$$

Posteriormente, otros autores como Medina [53] han propuesto metodologías eficaces para estimar el valor de temperatura inicial basándose en el número de movimientos que permiten en la iteración inicial. Este hecho tiene una relación directa con el comportamiento de la curva enunciada por White. El número de movimientos debe ser lo suficientemente elevado como para permitir una cierta exploración inicial del entorno, y del mismo modo

debe ser lo suficientemente reducido como para permitir alcanzar eficazmente la temperatura de descenso.

En cualquier caso, no existe una formulación generalmente aceptada que permita predecir el valor de la temperatura inicial. De hecho existe un cierto consenso general al respecto, que indica la necesidad de calibración de dicho parámetro, poniéndose de manifiesto la variabilidad del mismo en función del problema analizado. En este sentido, el autor de la presente tesis rubrica tales afirmaciones, exponiendo que el sistema tradicional de tratamiento del recocido simulado exige que la temperatura inicial del sistema deba ser ajustada al problema analizado.

El intento de adimensionalización del algoritmo basado en el empleo del concepto de aprovechamiento estructural anteriormente expuesto, pretende asimilar cualquier problema que se plantee a uno estándar con un funcionamiento característico y conocido. De este modo y desde el punto de vista teórico, este hecho permitiría poder establecer una ley que garantizase la temperatura inicial independientemente del problema estudiado. En este sentido, es importante reconocer que en dicha ley debería influir la proximidad de la solución de partida al óptimo global, de forma que la temperatura inicial permita diferentes grados de exploración en función del estado original de cálculo.

Tras estudiar el comportamiento del método en el problema que se plantea en la presente tesis doctoral se comprueba cómo la rigidez del método resulta excesiva cuando la probabilidad inicial de ascenso colina es inferior a 50.00 %. Partiendo de dicho valor se puede inferir el valor de temperatura inicial que garantiza dicho comportamiento a través de la expresión que gobierna la probabilidad de transición entre estados:

$$T_0 = \frac{(-0.20)}{\ln(0.50)} \frac{n_{ract}}{n_{rtot}} \quad (6.18)$$

donde n_{ract} representa el número de restricciones activas del diseño inicial, y n_{rtot} el número total de restricciones que condicionan el problema. No obstante, cabe notar que esta expresión únicamente proporciona un valor de referencia, no evitando la necesidad de calibración posterior del parámetro. En el capítulo siguiente, tras observar los resultados obtenidos se hará una interpretación de la metodología y funcionamiento del algoritmo, desarrollando con mayor profundidad su comportamiento.

6.5.8.2. Constante de Optimalidad

La constante de Optimalidad surge como analogía directa de la constante de Boltzman que gobierna la distribución exponencial del método de Metropolis, alterando el valor de temperatura a cada instante. No obstante, dicha analogía no está sustentada en un significado físico directo dentro del problema de optimización. Varios autores proporcionan a dicha

variable una relevancia ciertamente significativa, confiriéndole una responsabilidad directa en la capacidad y velocidad de convergencia del algoritmo [44].

Tal y como puede comprobarse en la Figura 6.9, la incidencia que dicho parámetro genera sobre la probabilidad de aceptación de posibles ascensos de colina es considerable. De forma más concreta, la constante de Boltzman permite ajustar el rango de incremento de la función objetivo para una determinada probabilidad de aceptación, por lo que de algún modo ajusta la rigidez natural del método.

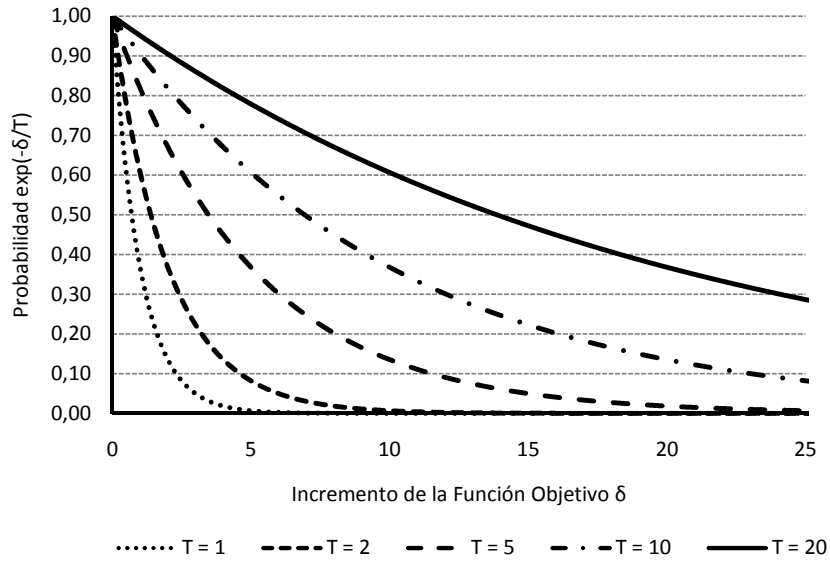


Figura 6.9: Evolución de la probabilidad de aceptación de acuerdo al producto entre la temperatura y la constante de optimalidad ($T = k t$) y al incremento de la función objetivo δ .

En cualquier caso, el objetivo estricto de la constante de optimalidad dentro del algoritmo es la de proporcionar un reescalado geométrico bien de la función de energía o bien de la temperatura característica del sistema. Los primeros autores restaban importancia a la influencia de dicho parámetro en el funcionamiento del algoritmo, incluso llegando a obviarlo. No obstante algunos investigadores como Wah [83] han identificado durante los últimos años su efecto proponiendo la necesidad de estudiar su valor empíricamente y de modo particularizado a cada problema.

El autor de la presente tesis reconoce la incidencia de dicho parámetro. No obstante, dado que desde un punto de vista conceptual carece de sentido, propone y considera más acertado introducir dicho coeficiente dentro de la temperatura. De este modo se aúnan en un sólo parámetro todos los conceptos relacionados con la convergencia y evolución del algoritmo.

6.5.8.3. Velocidad de Enfriamiento

En el recocido simulado, tal y como se ha definido anteriormente, la temperatura es el parámetro fundamental que controla el comportamiento general del algoritmo y gobierna su convergencia. Desde el nacimiento de esta teoría se han propuesto diferentes esquemas de enfriamiento que permiten evoluciones con mayor o menor velocidad hasta alcanzar la configuración elemental o de menor energía.

Algunos de los esquemas de enfriamiento más habituales se exponen en detalle a continuación.

6.5.8.3.1. Criterio de Descenso Exponencial

El descenso exponencial es el esquema de enfriamiento planteado inicialmente por Kirkpatrick [38] en los años 80. Se basa en un coeficiente que multiplica sucesivamente la temperatura en el instante dado para predecir la temperatura del instante siguiente. De acuerdo con este planteamiento la temperatura del proceso T_k en el instante de tiempo k se obtiene como:

$$T_k = \alpha^k T_0 \quad (6.19)$$

siendo α el factor multiplicador y T_0 el valor inicial de temperatura. Muchos autores han estudiado en profundidad el método, estableciendo el rango de valores más conveniente para el parámetro α . En este sentido Kuik y Salomon [40] en los años 1990 proponen como referencia $[0.80; 0.99]$, intervalo de valores lo suficientemente elevado como para asegurar un esquema de enfriamiento lento [40] (Figura 6.10).

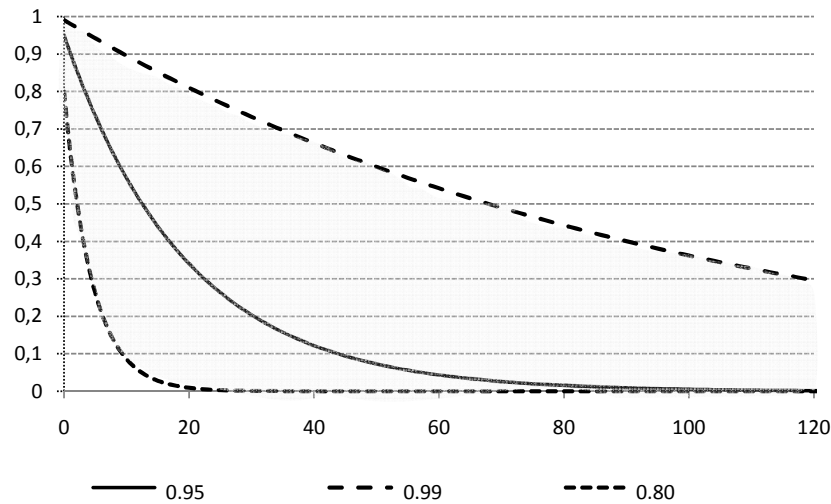


Figura 6.10: Evolución de la temperatura con el esquema Exponencial.

Posteriormente Orsila *et al.* [65], en su recopilación de buenas prácticas de 2008 sobre recocido simulado, reducen dicho rango de valores al intervalo $[0.90, 0.99]$. En el mismo estudio Orsila proponía como referencia general el valor de 0.95, aunque haciendo hincapié en la necesidad de particularizarlo al problema que se esté estudiando. En el algoritmo desarrollado en la presente tesis doctoral se ha implementado el esquema exponencial considerando un factor multiplicador de 0.99. En las conclusiones final del presente capítulo, se justificará y tratará con mayor profundidad dicha elección.

6.5.8.3.2. Criterio de Geman y Geman

Geman y Geman estudiaron en 1984 la aplicación del algoritmo al campo de la Restitución Bayesiana de imágenes, obteniendo resultados de gran interés en lo referente a la convergencia general del algoritmo. Los autores pudieron comprobar como la convergencia del algoritmo se veía claramente favorecida cuanto más lento era el proceso de enfriamiento.

De modo más particular observaron una mejoría en el comportamiento del algoritmo conforme la temperatura descendía de modo proporcional al logaritmo del número de iteraciones. Así, la temperatura T_k se obtendría en este caso como:

$$T_k = \frac{C}{\log_{10}(1 + k)} \quad (6.20)$$

siendo C un coeficiente característico del método.

Los autores consiguieron demostrar que para que las probabilidades de transición estacionarias del algoritmo tiendan a una distribución de probabilidad tipo Gibbs determinada, el coeficiente C debe corresponderse con el producto entre el número de grados de libertad N del problema y la diferencia entre el máximo y mínimo de la función objetivo Δ en el dominio estudiado. De este modo, los autores sentaron las bases de los futuros estudios acerca de la convergencia del algoritmo.

Posteriormente a finales de los años 80 Hajek [29] completaría la expresión demostrando que dicho parámetro C debe corresponder con la profundidad del mínimo local más bajo respecto del resto de valores que toma la función objetivo en el dominio. En cualquier caso, tal y como exponen los propios autores, no resulta razonable adoptar dicha expresión para el coeficiente C puesto que exige un número de iteraciones exageradamente elevado. Finalmente los autores ajustaron dicho parámetro de modo empírico, particularizándolo a su problema, y proponiendo un rango de valores comprendido entre 3.00 y 4.00.

Con el tiempo han surgido diferentes modificaciones a este esquema, manteniendo en todos los casos la proporcionalidad respecto a la inversa del logaritmo de las iteraciones, pero generando modelos de enfriamiento más lentos.

$$T_k = \frac{C}{1 + \log_{10}(k)} \quad (6.21)$$

La evolución de la temperatura que generan estos esquemas de enfriamiento puede observarse en la Figura 6.11.

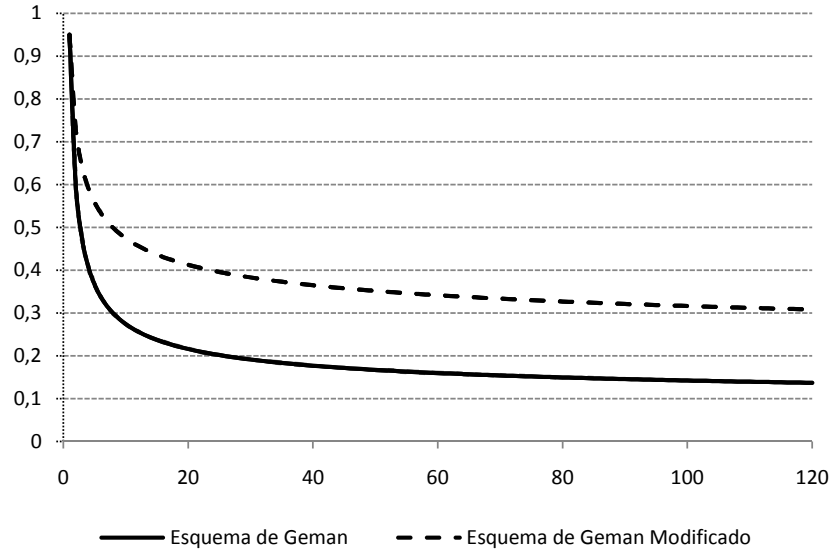


Figura 6.11: Evolución de la temperatura con el esquema propuesto por Geman y Geman.

6.5.8.3.3. Criterio de Gidas

A finales del año 1984, Gidas [25] publicó su análisis sobre las propiedades de las cadenas de Markov no estacionarias generadas durante el algoritmo de Recocido Simulado. Como ya se expuso anteriormente, en dicho análisis consiguió demostrar la convergencia del algoritmo siempre y cuando la temperatura se ajuste a la expresión:

$$T_k = \frac{C}{\log_{10}\left(\frac{k}{t_0}\right)}, \quad (6.22)$$

donde t_0 representa la temperatura inicial del esquema.

En su estudio Gidas adoptó el valor $t_0 = 1$. Por otro lado el parámetro C condiciona en gran medida la temperatura inicial del esquema de enfriamiento, por lo que aplicando la teoría expuesta anteriormente en el presente capítulo se puede obtener de forma directa la expresión que gobierna su valor como:

$$C = T_0 \log_{10}(2) \quad (6.23)$$

La Figura 6.12 muestra gráficamente la ley de enfriamiento del esquema de Gidas.

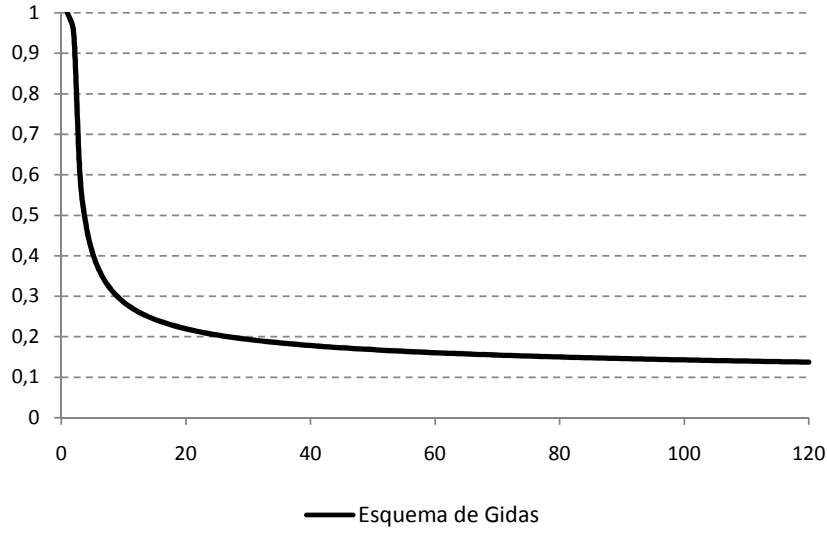


Figura 6.12: Evolución de la temperatura con el esquema de Gidas.

6.5.8.3.4. Otros Criterios de Enfriamiento

Paralelamente a los esquemas de enfriamiento anteriormente expuestos, existen otros métodos propuestos de forma heurística y que aplicados a ciertos problemas consiguen funcionamientos tan buenos o mejores que los expuestos previamente. Uno de los ejemplos de mayor popularidad en este sentido es el llamado Criterio de Lundy y Mees. Dichos autores establecieron en su estudio de convergencia del recocido simulado [46] que, para ciertos problemas, la aplicación del algoritmo no tiene porqué seguir un esquema de enfriamiento logarítmico.

A pesar de ello, no consiguieron demostrar de forma genérica la convergencia generalizada del algoritmo hacia el óptimo global. En cualquier caso, en su estudio resaltan la buena aproximación que realiza su esquema, que proporciona resultados lo suficientemente buenos como para ser aceptados. En su estudio obtenían la temperatura del sistema en un instante $k + 1$, a través de un parámetro característico β y de la temperatura del instante anterior, aplicando la siguiente expresión:

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{1 + \beta T_k} \quad (6.24)$$

La Figura 6.13 muestra gráficamente la ley de enfriamiento del esquema de Lundy y Mees. Existen otros métodos menos populares como el criterio de Cauchy en los que se proponen esquemas de enfriamiento más simplificados que los métodos logarítmicos, pero que en ningún caso consiguen garantizar una convergencia generalizada del algoritmo hacia

el óptimo global. Por ejemplo, la ley:

$$T_{k+1} = \frac{T_0}{1+k} \quad (6.25)$$

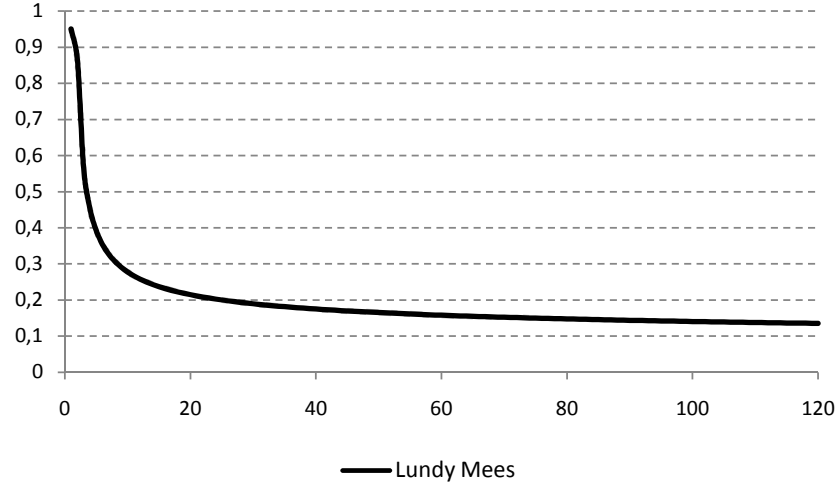


Figura 6.13: Evolución de la temperatura con el Esquema de Lundy y Mees.

6.5.8.4. Temperatura Final

Una vez alcanzado un determinado valor de temperatura el algoritmo pierde tal grado de flexibilidad que la probabilidad de aceptación de ascenso de colina es tan baja que el efecto de exploración de soluciones peores a la actual es prácticamente nulo. Para definir el criterio general de parada del algoritmo se establece un valor límite de temperatura por debajo del cual el comportamiento del mismo es lo suficientemente rígido como para impedir en la práctica el ascenso de colina.

En 1988, Otten y Ginneken [66] plantearon una interpretación estadística del funcionamiento del algoritmo y propusieron un criterio de parada basado en la varianza de la energía obtenida conforme avanza el algoritmo σ . De este modo, y conforme a la evolución del algoritmo mostrada en la Figura 6.14 la temperatura final de parada la establecían de acuerdo a la siguiente expresión:

$$t_e = T \left(\frac{1}{2} - \frac{T^2 \log(k)}{\sigma^2} \right) \quad (6.26)$$

No obstante dicha formulación sustituye la capacidad de mejora de la función objetivo o tolerancia por una estimación estadística del proceso estocástico en el que en función de la varianza de la serie obtenida durante el desarrollo del algoritmo se decide su parada.

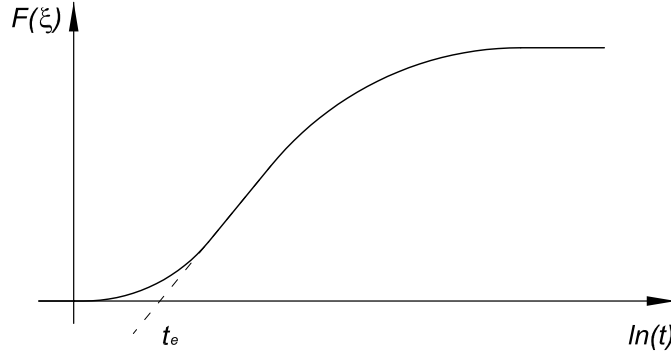


Figura 6.14: Gráfico de la Temperatura de Parada definido por Otten y Ginneken.

Este hecho puede llegar a generar situaciones de congelación indeseada, en las que la serie estocástica generada por el algoritmo llegue a falsear su cercanía a la solución.

Por ello, el autor de la presente tesis propone que partiendo de la ecuación general del algoritmo y considerando una probabilidad de congelación del 0.10 %, se puede establecer una relación entre dicho valor y la temperatura límite. En este sentido y asumiendo que la ecuación general del algoritmo caracteriza la función de densidad de una distribución de Boltzmann - Gibbs, se puede obtener el valor de temperatura que proporciona la probabilidad de aceptación como:

$$T_{lim} = \frac{-k F_0}{\ln(0.001)} \quad (6.27)$$

Atendiendo a la formulación expuesta se considera que el incremento de la función objetivo tomado como referencia será de 0.10 %. No obstante, con el objeto de incrementar el efecto de las restricciones en el problema se procede al producto del valor de temperatura obtenido por el valor medio del aprovechamiento inicial de las restricciones. De este modo cuanto menor sea el aprovechamiento, y por ende más holgado sea el diseño inicial, menor será el valor de temperatura final, lo que permite la realización de un mayor número de iteraciones. Así, la temperatura límite propuesta en la presente tesis doctoral se obtiene como:

$$T_{lim} = \frac{-0.001 F_0}{\ln(0.001)} \sum_{j=1}^n \frac{a_j(\xi)}{n} \quad (6.28)$$

6.6. Implementación de los Criterios de Convergencia o Parada

Finalmente, la parada del algoritmo se plantea a través de dos métodos diferentes. Un primer método basado en la congelación del algoritmo al descender la temperatura por debajo de la temperatura final expuesta anteriormente, y otro segundo debido a un estancamiento del algoritmo en torno a un punto.

En el primero de los casos la parada se realiza siempre y cuando el punto analizado del algoritmo impida un descenso de valle. Por el contrario, el segundo de los criterios de parada se origina cuando el algoritmo proporciona 5 iteraciones consecutivas superando el número máximo de iteraciones planteado. Debido a la diferente sensibilidad que el problema tiene respecto a los diversos tipos de variables, se ha optado por considerar la parada siempre y cuando esas cinco iteraciones consecutivas respondan a modificaciones de geometría. En esta situación se considera que el algoritmo se encuentra en un punto lo suficientemente bajo como para no encontrar una posición factible y, por tanto, se detiene.

6.7. Resumen

En el presente capítulo se ha tratado de exponer con el mayor detalle posible, las principales características de la metodología de optimización propuesta. A continuación se tratará una breve recapitulación de los aspectos más novedosos que incorpora el algoritmo propuesto.

El método de optimización desarrollado se basa en el algoritmo de recocido simulado, enunciado por Kirkpatrick en 1983, y que se fundamenta en la analogía entre la optimización y el templado de los metales. El recocido o temple de los metales, es un tratamiento térmico consistente en la aplicación de calor a una masa estable metálica, para posteriormente permitir su enfriamiento del modo más lento posible. De este modo se consigue una reorganización de la estructura cristalina del metal, modificando considerablemente sus propiedades.

En este sentido, el efecto físico del templado busca la configuración cristalina del metal con el menor estado energético posible. Desde el punto de vista conceptual este procedimiento guarda una relación directa con el proceso de optimización, de forma que es posible establecer una analogía directa entre ambos procesos. Con todo ello, el algoritmo numérico basa su funcionamiento en una variable de control llamada temperatura, que gestiona la evolución del método, condicionando tanto el inicio como el desarrollo y detención del mismo. De este modo, en base a un esquema de enfriamiento el algoritmo establece un

procedimiento iterativo basado en sucesivas pruebas, de la siguiente forma:

- Si el valor de la función de energía de la nueva configuración es menor, se acepta la configuración y se reinicia el proceso.
- Si el valor de la función de energía de la nueva configuración es mayor, se le asocia una probabilidad aleatoria y se verifica con la probabilidad de equilibrio de Boltzman. Si esta probabilidad es superior a la de la configuración, se acepta, en caso contrario se rechaza.

Debido al elevado número de pruebas que requiere el algoritmo, la metodología presentada en la presente tesis doctoral incorpora un análisis de sensibilidad de primer orden que permite reducir el coste computacional del procedimiento. La inclusión de este tipo de técnicas no ha sido considerada tradicionalmente en la implementación del recocido simulado, posiblemente debido a que el tamaño de los problemas analizados no lo requiso. No obstante dado el problema tratado en la presente tesis doctoral, la inclusión de este tipo de análisis supone una más que considerable aceleración del procedimiento.

Por otro lado, en lo referente a la temperatura, el algoritmo se articula en torno a una ley de evolución térmica, o esquema de enfriamiento, que marca el desarrollo del proceso de optimización. Diversos autores han comprobado cómo el comportamiento del algoritmo se ve claramente mejorado conforme la velocidad de enfriamiento disminuye. En el marco de la presente tesis doctoral se ha optado por un patrón de enfriamiento de tipo exponencial con un factor multiplicador de 0.99. De este modo se consigue un esquema de enfriamiento lo suficientemente lento como para favorecer la convergencia del algoritmo, y lo suficientemente rápido como para proporcionar tiempos de computación razonables.

Desde el punto de vista de las variables que intervienen en el problema, uno de los principales retos a los que tiene que enfrentarse el método propuesto es al tratamiento de las variables discretas. En el problema analizado, las variables de naturaleza discreta corresponden a las variables seccionales. Dado que en este tipo de estructuras se emplean habitualmente perfiles metálicos angulares de lados iguales, las características seccionales se definen a partir de la longitud y el espesor de las alas. Estas variables, tal y como se expuso con mayor profundidad en capítulos anteriores de la presente tesis doctoral, poseen un doble carácter discreto. Por una parte está el carácter discreto individual de cada una de ellas, y por otro el carácter discreto del conjunto por tratarse de perfiles pertenecientes a catálogos comerciales. En este sentido, el método definido en la presente tesis recoge este doble carácter discreto a través del “mapeado” de las variables seccionales. Cuando el algoritmo del recocido simulado genera una dirección aleatoria de avance, el

citado “mapeado” identifica dos variables discretas iniciales, la longitud del ala y el espesor. De este modo, el algoritmo decide la dirección de modificación de dichas variables iniciales, para posteriormente escoger el perfil que mejor se ajuste. Para ello se comprueban las parejas contiguas que existen en el catálogo comercial, adoptando aquella que más se aproxime a las direcciones individuales obtenidas.

Dada la diversidad de tipologías existentes, así como a las diferentes solicitudes a las que puede verse sometida la misma estructura dependiendo de su función en la línea, resulta imprescindible dotar al algoritmo de cierta generalidad para que resulte eficaz. Para ello, se ha diseñado una función objetivo que aglutine la mayor información posible acerca del estado estructural de la torre, procurando siempre que dicha información se muestre de modo adimensional y compatible con el resto. En este sentido, la función objetivo debe agrupar dos tipos de información diferente, el valor del peso total de la torre y el valor de las restricciones que condicionan el proceso de optimización. Para alcanzar la deseada adimensionalidad, se ha recurrido, en el primero de los casos, a la relación existente entre el peso total de la estructura y el peso inicial de la torre analizada. En el segundo de los casos, se ha optado por considerar el aprovechamiento estructural de las restricciones, concepto que garantiza la adimensionalización y permite compatibilizar la información, tal y como se expuso con anterioridad en el capítulo 4.

No obstante, el concepto del aprovechamiento estructural presenta ciertos problemas dada la implementación del análisis de sensibilidad. Debido a la no linealidad de las restricciones que intervienen en el problema, una aproximación mediante el desarrollo en serie de Taylor de primer orden como la planteada puede suponer desviaciones relevantes. Para corregir tales errores, la información relativa a las restricciones se incorpora a la función objetivo mediante funciones de penalización exterior. De este modo se tiende a redirigir el valor de las restricciones al dominio de la aceptación, mitigando los errores propagados por el análisis de sensibilidad.

Una vez definidas las principales aportaciones a nivel algorítmico de la presente tesis doctoral, se procederá a evaluar y detallar el funcionamiento del mismo. Para ello en el siguiente capítulo se tratarán los resultados obtenidos de la aplicación del método propuesto a diferentes casos reales.

“Largo es el camino de la enseñanza por medio de teorías; breve y eficaz por medio de ejemplos.”
Lucio Anneo Séneca (Filósofo Romano. Córdoba
1 - Roma 65)

Capítulo 7

Ejemplos de Aplicación

7.1. Introducción

Una vez expuesta la metodología implementada, así como la naturaleza del algoritmo empleado y aquellas particularidades que lo caracterizan, debe abordarse su comportamiento desde el punto de vista práctico. En este sentido en el presente capítulo se llevará a cabo el análisis del algoritmo a través de tres casos diferentes de torre de alta tensión:

- Torre de Alta Tensión para doble circuito en capa de 400 kV en amarre, con Doble Cable de Guarda y una altura máxima de diseño de 41.20 m.
- Torre de Alta Tensión para doble circuito en capa de 220 kV en amarre, con un único cable de Guarda y una altura máxima de diseño de 65.00 m.
- Torre de Alta Tensión para simple circuito a tresbolillo de 132 kV en amarre con un único cable de guarda y una altura máxima de diseño de 26.40 m.

A través de estos tres ejemplos se estudiarán los diversos aspectos del algoritmo anteriormente expuestos, así como las diferentes particularidades que caracterizan la solución obtenida. Para el caso del análisis de tiempo de computación, el cálculo de los ejemplos se ha llevado a cabo en una máquina de doble núcleo con 2.00 GHz y 4.00 Gb de memoria

RAM. En los archivos contenidos en el CD-ROM que se adjunta como anexo a esta tesis doctoral están los principales datos obtenidos de la aplicación del algoritmo.

7.2. Ejemplo de aplicación 1: Torre de 400 kV

Tal y como se expuso en el epígrafe anterior el primero de los ejemplos de aplicación estudiados corresponde con un modelo de torre de alta tensión diseñado para soportar un doble circuito de 400 kV con disposición en capa y doble cable de guarda (Figura 7.1). Este tipo de estructuras son comunes en las grandes líneas de transporte de energía que comunican los centros de generación y las subestaciones de distribución.



Figura 7.1: Torre de 400 kV: Ejemplos reales de torre de alta tensión de similares características a la analizada en el ejemplo 1.

El peso total de este tipo de estructuras, descontando herrajes o apareamiento auxiliar, oscila, en función de la altura nominal del apoyo, entre las 10 y las 40 toneladas, influyendo significativamente la funcionalidad de la estructura.

7.2.1. Geometría Considerada

La geometría de estructura de transporte escogida (Figura 7.2) se compone de la superposición de 15 módulos con la secuencia y dimensiones que se muestran en la tabla 7.1.

Módulo	Altura (m)	Cota (m)	Base Inf. X (m)	Base Inf. Y (m)	Base Sup. X (m)	Base Sup. Y (m)	Long. ala (m)	Altura alas (m)
1 K	3.60	3.60	6.52	6.52	5.86	5.86	—	—
2 X Arriostrada	3.60	7.20	5.86	5.86	5.20	5.20	—	—
3 X Arriostrada	4.00	11.20	5.20	5.20	4.48	4.48	—	—
4 X Arriostrada	4.00	15.20	4.48	4.48	3.75	3.75	—	—
5 Súper X Arriostr.	4.00	19.20	3.75	3.75	3.06	3.06	—	—
6 Cruceta Larga	2.00	21.20	3.06	3.06	2.40	2.40	7.00	—
7 X	2.00	23.20	2.40	2.40	2.40	2.40	—	—
8 X	2.00	25.20	2.40	2.40	2.40	2.40	—	—
9 Súper X	2.00	27.20	2.40	2.40	2.40	2.40	—	—
10 Cruceta Larga	2.00	29.20	2.40	2.40	2.40	2.40	8.25	—
11 X	2.00	31.20	2.40	2.40	2.40	2.40	—	—
12 X	2.00	33.20	2.40	2.40	2.40	2.40	—	—
13 Súper X	2.00	35.20	2.40	2.40	2.40	2.40	—	—
14 Cruceta Larga	2.00	37.20	2.40	2.40	2.40	2.40	7.00	—
15 Doble Cúpula	2.00	39.20	2.40	2.40	2.40	2.40	8.00	4.00

Tabla 7.1: Torre de 400 kV: Listado de módulos que componen la estructura.

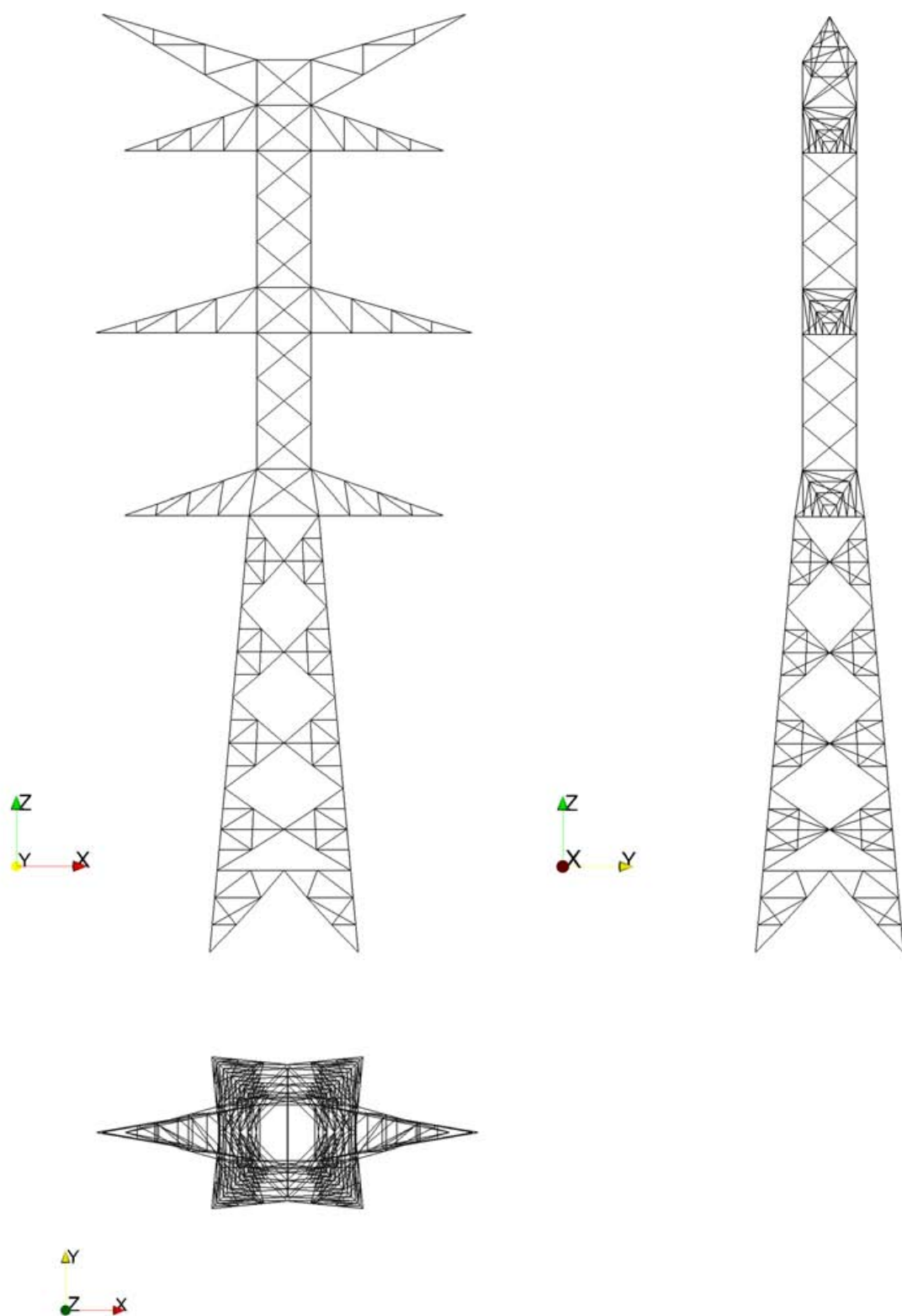


Figura 7.2: Torre de 400 kV: Geometría de la torre analizada

De este modo se compone una geometría con un total de 296 nodos y 922 elementos, agrupados en 66 secciones diferentes de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 7.3 y con un peso total de partida de 22.297 toneladas. A continuación en las Tablas 7.2 se recogen la codificación de materiales en la estructura.

Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
1	L180.15	51.75	641.62	34	L70.7	9.31	17.15
2	L90.8	13.76	42.40	35	L180.15	51.75	641.62
3	L70.7	9.31	17.15	36	L120.10	23.00	126.74
4	L70.7	9.31	17.15	37	L150.12	34.56	298.60
5	L70.7	9.31	17.15	38	L120.10	23.00	126.74
6	L90.8	13.76	42.40	39	L150.12	34.56	298.60
7	L90.8	13.76	42.40	40	L120.10	23.00	126.74
8	L180.15	51.75	641.62	41	L110.10	21.00	96.47
9	L70.7	9.31	17.15	42	L150.12	34.56	298.60
10	L70.7	9.31	17.15	43	L120.10	23.00	126.74
11	L110.10	21.00	96.47	44	L110.10	21.00	96.47
12	L120.10	23.00	126.74	45	L110.10	21.00	96.47
13	L180.15	51.75	641.62	46	L60.5	5.75	7.92
14	L70.7	9.31	17.15	47	L60.5	5.75	7.92
15	L70.7	9.31	17.15	48	L120.10	23.00	126.74
16	L110.10	21.00	96.47	49	L90.8	13.76	42.40
17	L120.10	23.00	126.74	50	L120.10	23.00	126.74
18	L180.15	51.75	641.62	51	L90.8	13.76	42.40
19	L70.7	9.31	17.15	52	L120.10	23.00	126.74
20	L70.7	9.31	17.15	53	L90.8	13.76	42.40
21	L110.10	21.00	96.47	54	L110.10	21.00	96.47
22	L120.10	23.00	126.74	55	L120.10	23.00	126.74
23	L180.15	51.75	641.62	56	L80.6	9.24	22.83
24	L70.7	9.31	17.15	57	L80.6	9.24	22.83
25	L70.7	9.31	17.15	58	L90.8	13.76	42.40
26	L110.10	21.00	96.47	59	L60.5	5.75	7.92
27	L120.10	23.00	126.74	60	L60.5	5.75	7.92
28	L110.10	21.00	96.47	61	L120.10	23.00	126.74
29	L180.15	51.75	641.62	62	L80.6	9.24	22.83
30	L110.10	21.00	96.47	63	L110.10	21.00	96.47
31	L90.8	13.76	42.40	64	L75.7	10.01	21.32
32	L90.8	13.76	42.40	65	L75.7	10.01	21.32
33	L70.7	9.31	17.15	66	L80.6	9.24	22.83

Tabla 7.2: Torre de 400 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la estructura.

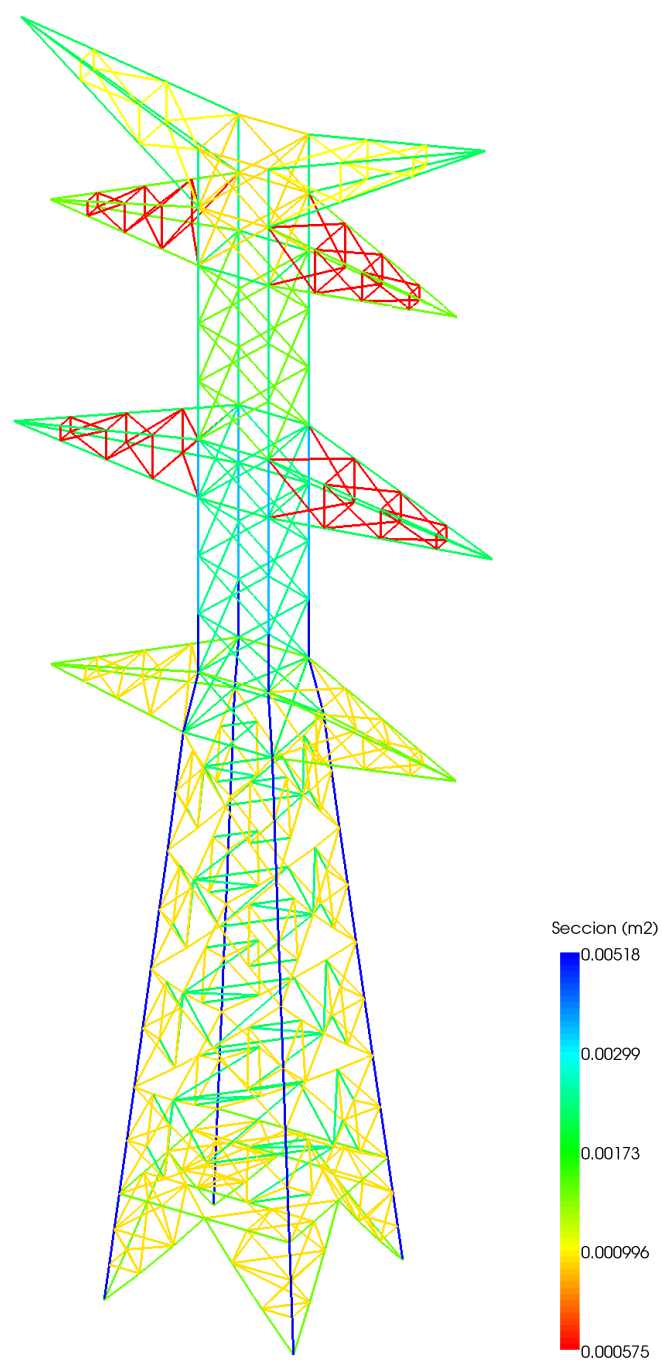


Figura 7.3: Torre de 400 kV: Distribución de material dentro la estructura.

Para más información sobre la geometría, conectividad y distribución de materiales

inicial dentro de la estructura, se puede consultar en los archivos adjuntos a la tesis, en la carpeta Ejemplo 1.

7.2.2. Cargas Actuantes

Las cargas actuantes consideradas se han definido adoptando los valores propuestos por los fabricantes de apoyos para esta configuración estructural y asumiendo un apoyo de 1ª categoría. De este modo se obtiene el siguiente esquema de cargas, de acuerdo a sistema de cables recogido en la Figura 7.4.

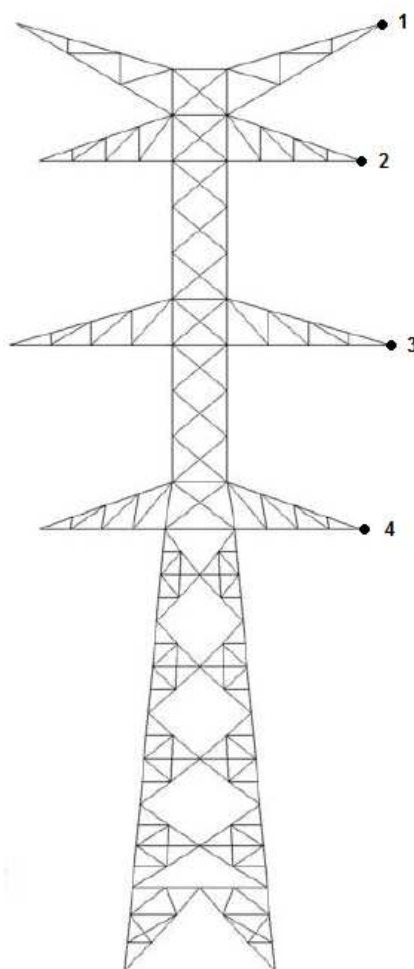


Figura 7.4: Torre de 400 kV: Sistema de cableado elegido.

En la Tabla 7.3 se adjuntan los esfuerzos que componen cada uno de las hipótesis de carga estudiadas en el capítulo 3 (viento, hielo, desequilibrio de conductores y rotura de

Cable	Hipótesis	Carga Longitudinal (T)	Carga Vertical (T)	Carga Transversal (T)
1	1 ^a	0.000	−2.556	3.348
	2 ^a	0.000	−5.336	2.819
	3 ^a	1.620	−5.336	2.608
	4.1 ^a	5.400	−5.336	2.819
	4.2 ^a	0.000	−5.336	2.819
	4.3 ^a	0.000	−5.336	2.819
	4.4 ^a	0.000	−5.336	2.819
2	1 ^a	0.000	−2.556	3.348
	2 ^a	0.000	−5.336	2.819
	3 ^a	1.620	−5.336	2.608
	4.1 ^a	0.000	−5.336	2.819
	4.2 ^a	5.400	−5.336	2.819
	4.3 ^a	0.000	−5.336	2.819
	4.4 ^a	0.000	−5.336	2.819
3	1 ^a	0.000	−2.556	3.348
	2 ^a	0.000	−5.336	2.819
	3 ^a	1.620	−5.336	2.608
	4.1 ^a	0.000	−5.336	2.819
	4.2 ^a	0.000	−5.336	2.819
	4.3 ^a	5.400	−5.336	2.819
	4.4 ^a	0.000	−5.336	2.819
4	1 ^a	0.000	−0.343	0.758
	2 ^a	0.000	−1.179	0.783
	3 ^a	0.450	−1.179	0.724
	4.1 ^a	0.000	−1.179	0.783
	4.2 ^a	0.000	−1.179	0.783
	4.3 ^a	0.000	−1.179	0.783
	4.4 ^a	3.000	−1.179	0.783

Tabla 7.3: Torre de 400 kV: Cargas en toneladas sobre cada uno de los puntos de amarre de los conductores para las diferentes hipótesis de carga consideradas.

conductor), sobre la mitad de la estructura. En todos los casos la distribución es simétrica respecto al eje de la cimentación, salvo en la cuarta hipótesis, en donde las cargas longitudinales son nulas para los puntos de amarre no especificados.

7.2.3. Estado Inicial de las Restricciones

Una vez definida tanto la geometría de la estructura como las cargas exteriores que la solicitan se puede analizar el estado de las restricciones del problema en la iteración inicial. En este sentido, se adjunta a continuación una serie de gráficos en los que se muestra el valor de las restricciones en función de la naturaleza a la que pertenecen: esbeltez seccional (Figura 7.5), esbeltez elemental (Figura 7.6) y esfuerzo (Figura 7.7).

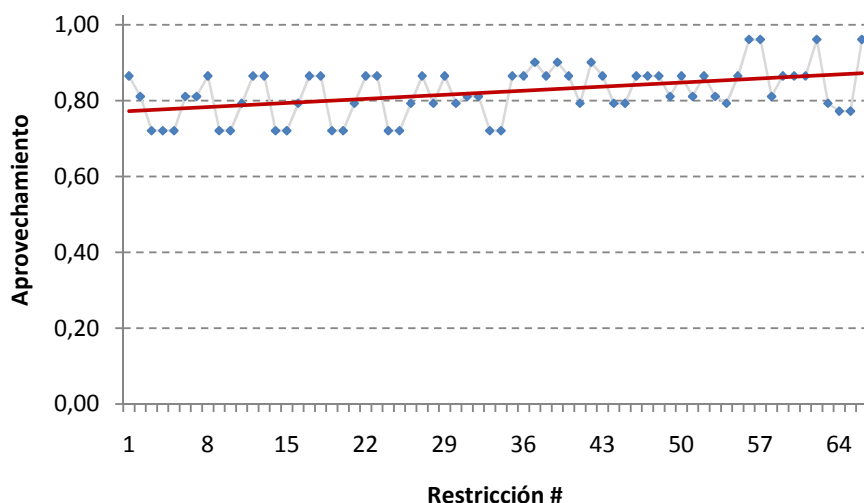


Figura 7.5: Torre de 400 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez seccional.

Con todo ello, existen un total de 36 restricciones activas,

- 7 restricciones de esbeltez seccional.
- 27 restricciones de esbeltez elemental.
- 2 restricciones en esfuerzos.

De este modo y de acuerdo con los gráficos, tanto las restricciones en esbeltez seccional como las restricciones en esbeltez elemental son las que, a priori, condicionan el diseño inicial. En este sentido podría considerarse que el problema está condicionado por la propia geometría de la torre, que es la principal responsable de la esbeltez elemental.

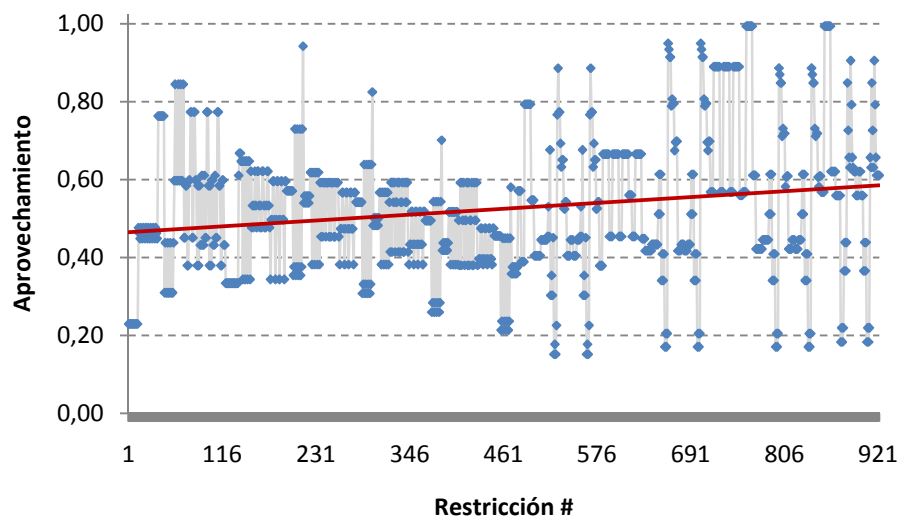


Figura 7.6: Torre de 400 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez elemental.

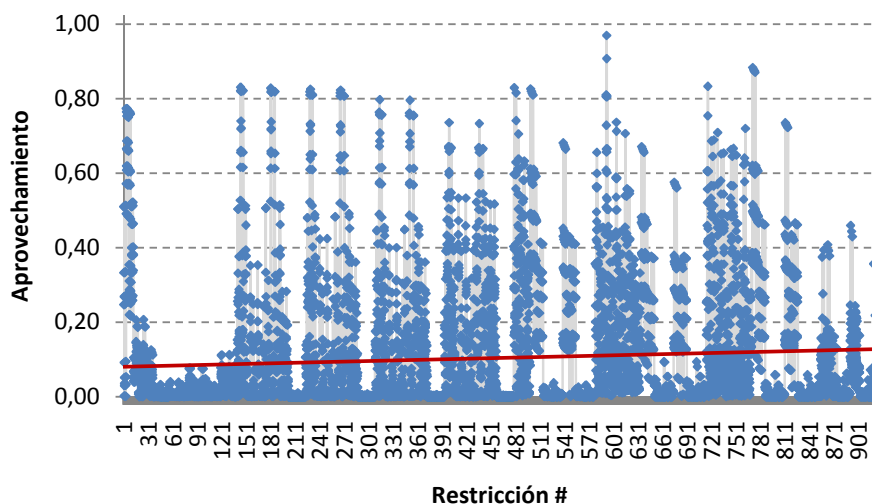


Figura 7.7: Torre de 400 kV: Valor inicial de las restricciones de esfuerzos.

7.2.4. Resultados de la Optimización

El algoritmo y la metodología expuesta en la presente tesis, consiguen una efectiva reducción del peso total de la estructura bajo un coste computacional razonable. Como puede observarse en la Tabla 7.4, el algoritmo encuentra un resultado a las 824 iteraciones, obteniendo un peso de 16.571 toneladas, equivalente a una reducción del 25.68 % respecto al estado inicial.

RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA EVOLUCIÓN DE LA TORRE DE 400kV	
Nº de Materiales	66
Nº de Elementos	922
Nº Total de Variables	164
Nº de Restricciones	10208
Peso Inicial (t)	22.297
Peso Final (t)	16.571
Porcentaje de Reducción	25.683
Nº de Iteraciones Totales	824
Iteración del Máximo	813
Tiempo de Computación Empleado (s)	7185.31
Temperatura Inicial	0.10e-02
Temperatura Final	0.25e-06

Tabla 7.4: Torre de 400 kV: Resumen de las principales características del algoritmo.

La geometría obtenida así como la distribución final del material se adjuntan en las tablas 7.5 y 7.6, así como en las Figuras 7.8 y 7.9.

Módulo	Altura (m)	Base Inf. X (m)	Base Inf. Y (m)	Base Sup. X (m)	Base Sup. Y (m)	Long. ala (m)	Altura alas (m)
1 K	3.60	6.16	5.92	5.44	4.96	—	—
2 X Arriostrada	3.60	5.44	4.96	5.26	4.51	—	—
3 X Arriostrada	4.00	5.26	4.51	4.69	4.03	—	—
4 X Arriostrada	4.00	4.69	4.03	3.89	3.77	—	—
5 Súper X Arriostr.	4.00	3.89	3.77	2.83	2.29	—	—
6 Cruceta Larga	2.00	2.83	2.29	2.74	1.87	7.00	—
7 X	2.00	2.74	1.87	2.80	2.31	—	—
8 X	2.00	2.80	2.31	2.21	2.24	—	—
9 Súper X	2.00	2.21	2.24	2.13	2.04	—	—
10 Cruceta Larga	2.00	2.13	2.04	2.39	2.05	8.25	—
11 X	2.00	2.39	2.05	2.02	2.22	—	—
12 X	2.00	2.02	2.22	2.52	2.25	—	—
13 Súper X	2.00	2.52	2.25	2.40	1.86	—	—
14 Cruceta Larga	2.00	2.40	1.86	2.47	2.21	7.00	—
15 Doble Cúpula	2.00	2.47	2.21	2.46	2.32	8.00	4.00

Tabla 7.5: Torre de 400 kV: Valores de las variables geométricas para la solución.

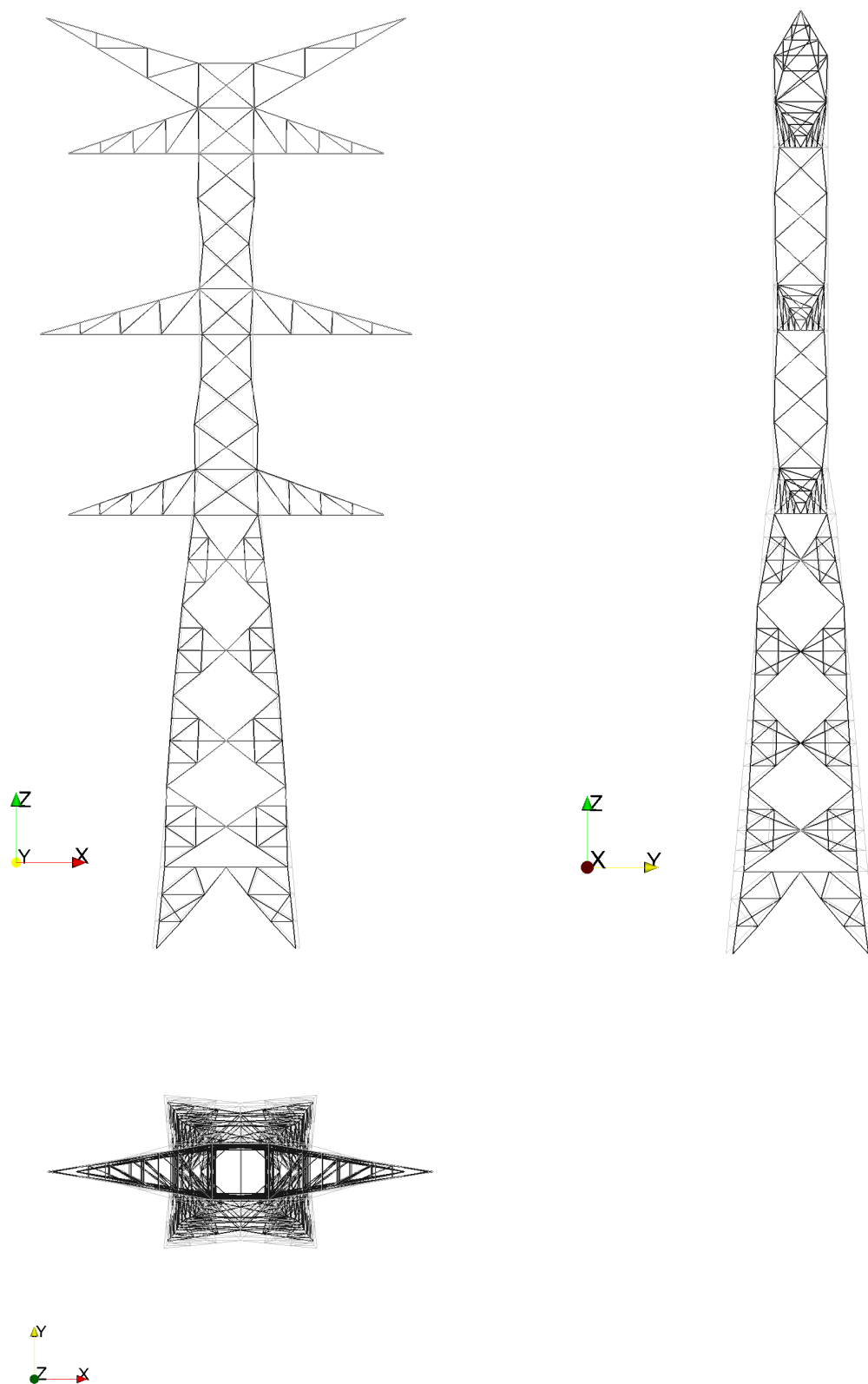


Figura 7.8: Torre de 400 kV: Geometría de la solución obtenida para la torre analizada.

Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
1	L180.13	45.11	565.79	34	L50.4	3.84	3.68
2	L75.6	8.64	18.66	35	L160.16	48.64	468.24
3	L60.5	5.75	7.92	36	L110.10	21.00	96.46
4	L60.6	6.84	9.25	37	L150.12	34.56	298.59
5	L60.6	6.84	9.25	38	L110.10	21.00	96.46
6	L75.6	8.64	18.66	39	L120.13	29.51	158.39
7	L70.7	9.31	17.15	40	L110.10	21.00	96.46
8	L180.13	45.11	565.79	41	L110.8	16.96	79.40
9	L75.6	8.64	18.66	42	L120.13	29.51	158.39
10	L70.5	6.75	12.81	43	L110.10	21.00	96.46
11	L80.6	9.24	22.82	44	L80.7	10.71	26.11
12	L110.8	16.96	79.40	45	L110.8	16.96	79.40
13	L160.15	45.75	443.32	46	L40.3	2.31	1.42
14	L70.5	6.75	12.81	47	L60.6	6.84	9.25
15	L60.6	6.84	9.25	48	L110.10	21.00	96.46
16	L70.6	8.04	15.03	49	L90.7	12.11	37.75
17	L110.10	21.00	96.46	50	L110.10	21.00	96.46
18	L150.16	45.44	381.77	51	L90.9	15.39	46.87
19	L70.5	6.75	12.81	52	L110.10	21.00	96.46
20	L40.3	2.31	1.42	53	L100.8	15.36	58.98
21	L70.6	8.04	15.03	54	L110.10	21.00	96.46
22	L80.6	9.24	22.82	55	L90.9	15.39	46.87
23	L180.13	45.11	565.79	56	L80.6	9.24	22.82
24	L75.6	8.64	18.66	57	L75.6	8.64	18.66
25	L45.5	4.25	3.19	58	L90.7	12.11	37.75
26	L70.6	8.04	15.03	59	L40.4	3.04	1.82
27	L75.7	10.01	21.32	60	L70.5	6.75	12.81
28	L110.10	21.00	96.46	61	L80.8	12.16	29.26
29	L150.14	40.04	341.15	62	L80.7	10.71	26.11
30	L110.10	21.00	96.46	63	L90.8	13.76	42.40
31	L60.6	6.84	9.25	64	L40.3	2.31	1.42
32	L90.8	13.76	42.40	65	L70.5	6.75	12.81
33	L40.3	2.31	1.42	66	L75.8	11.36	23.86

Tabla 7.6: Torre de 400 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría.

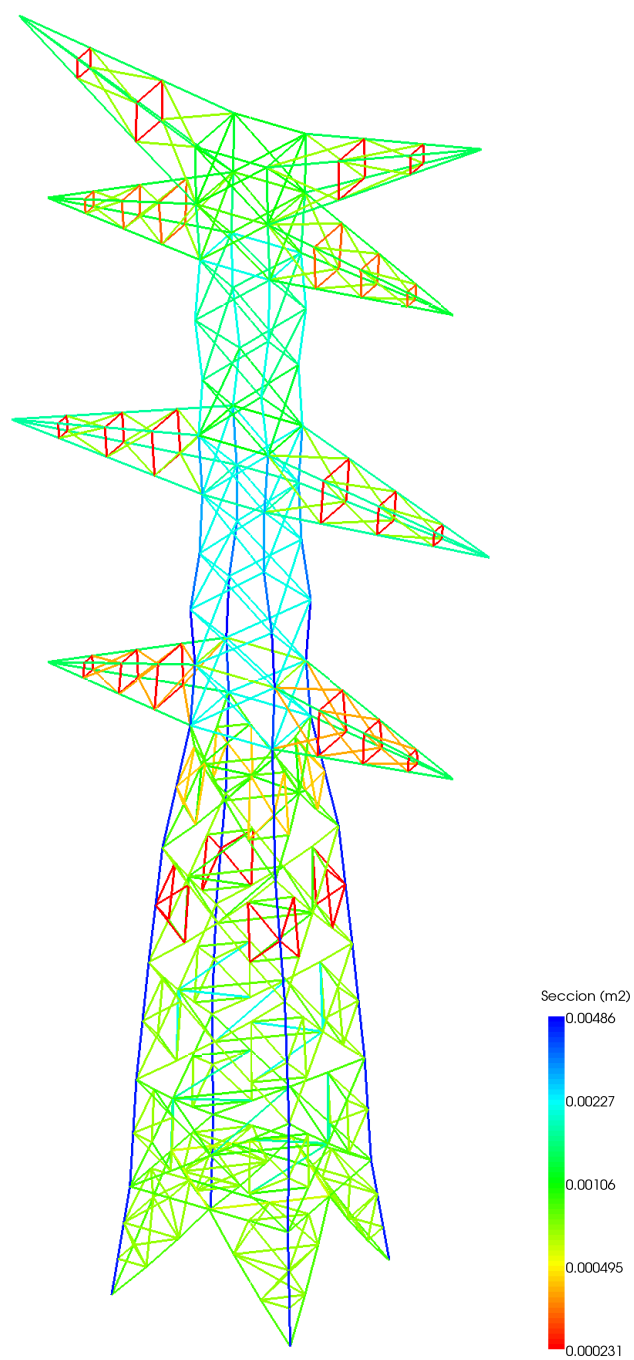


Figura 7.9: Torre de 400 kV: Distribución de material en la estructura.

En este sentido el diseño original de la estructura sufre una considerable modificación tal y como puede observarse en la Figura 7.8. En ella pueda comprobarse como la geometría de la torre se estiliza, redistribuyendo la masa de la estructura hacia sus montantes, en perjuicio de las barras secundarias y redundantes.

Por otro lado, el incremento de la anchura del fuste en los módulos próximos a las crucetas, es representativo de la naturaleza de los esfuerzos que la solicitan. La parte inferior de una cruceta se caracteriza por estar estructuralmente comprimida, mientras que los elementos situados en la parte superior se encuentran traccionados con magnitudes similares, tal y como puede comprobarse en la envolvente de esfuerzos recogida en las Figura 7.10.

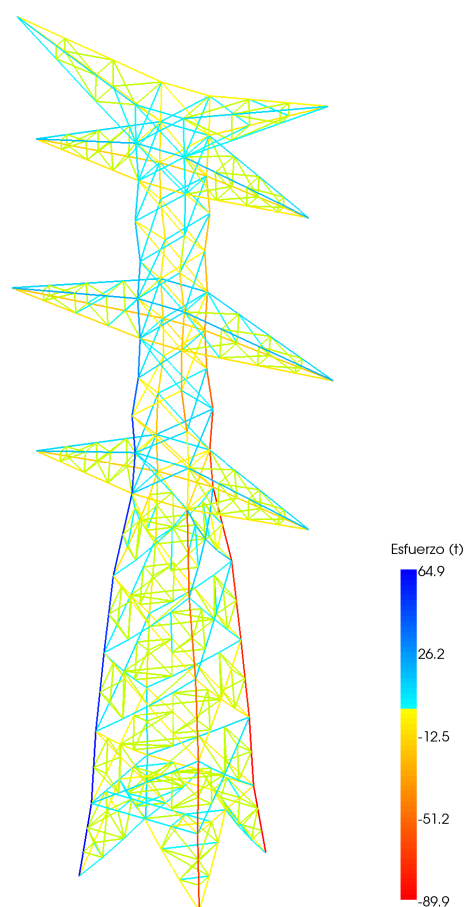


Figura 7.10: Torre de 400 kV: Envolvente de los esfuerzos obtenidos.

De modo más detallado, el comportamiento estructural de la solución obtenida ante cada una de las hipótesis de carga estudiadas se adjunta en las Figuras 7.11 a 7.20.

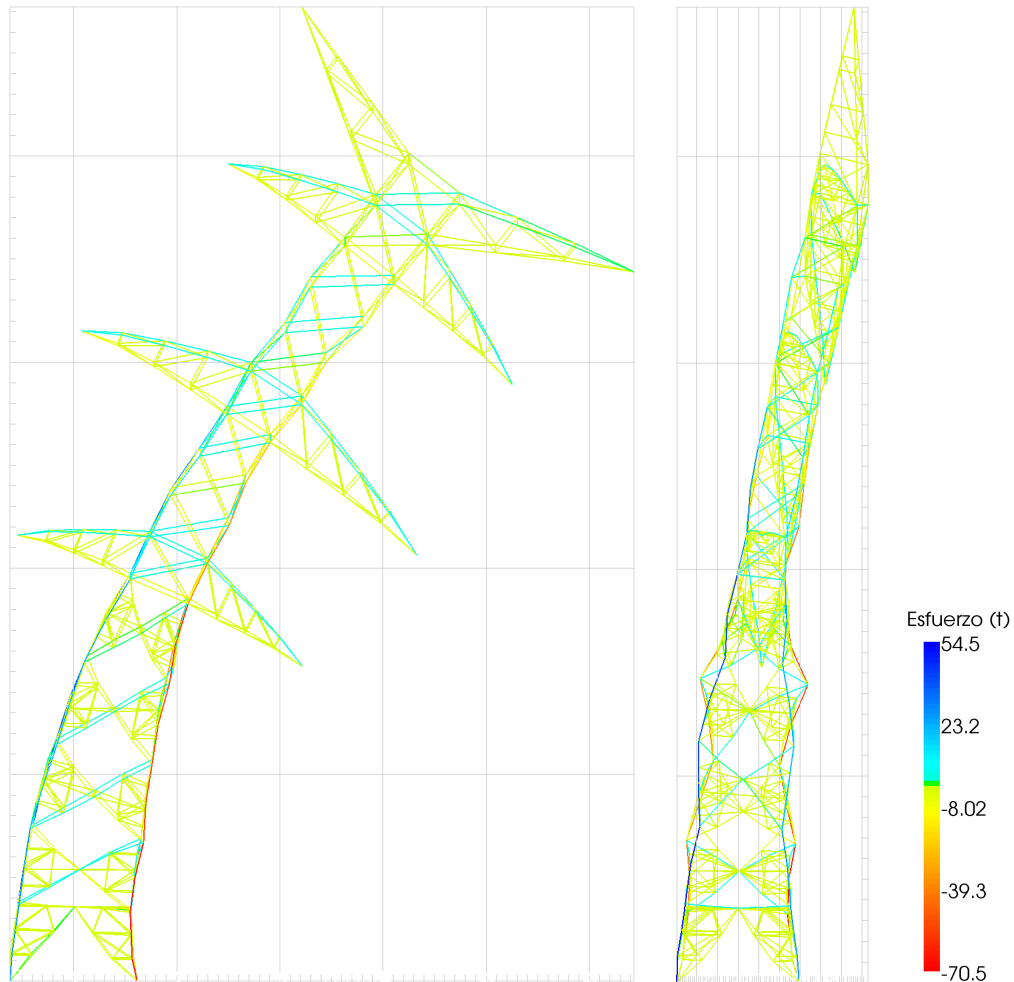


Figura 7.11: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección N.

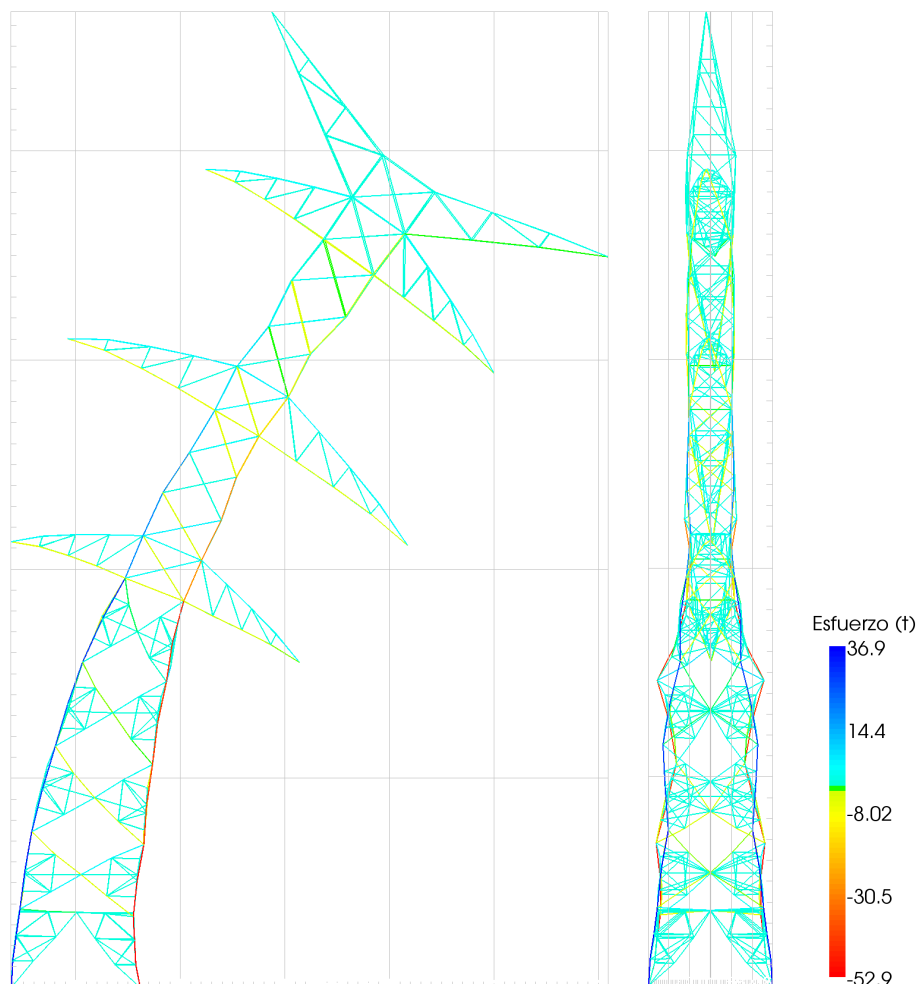


Figura 7.12: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección E.

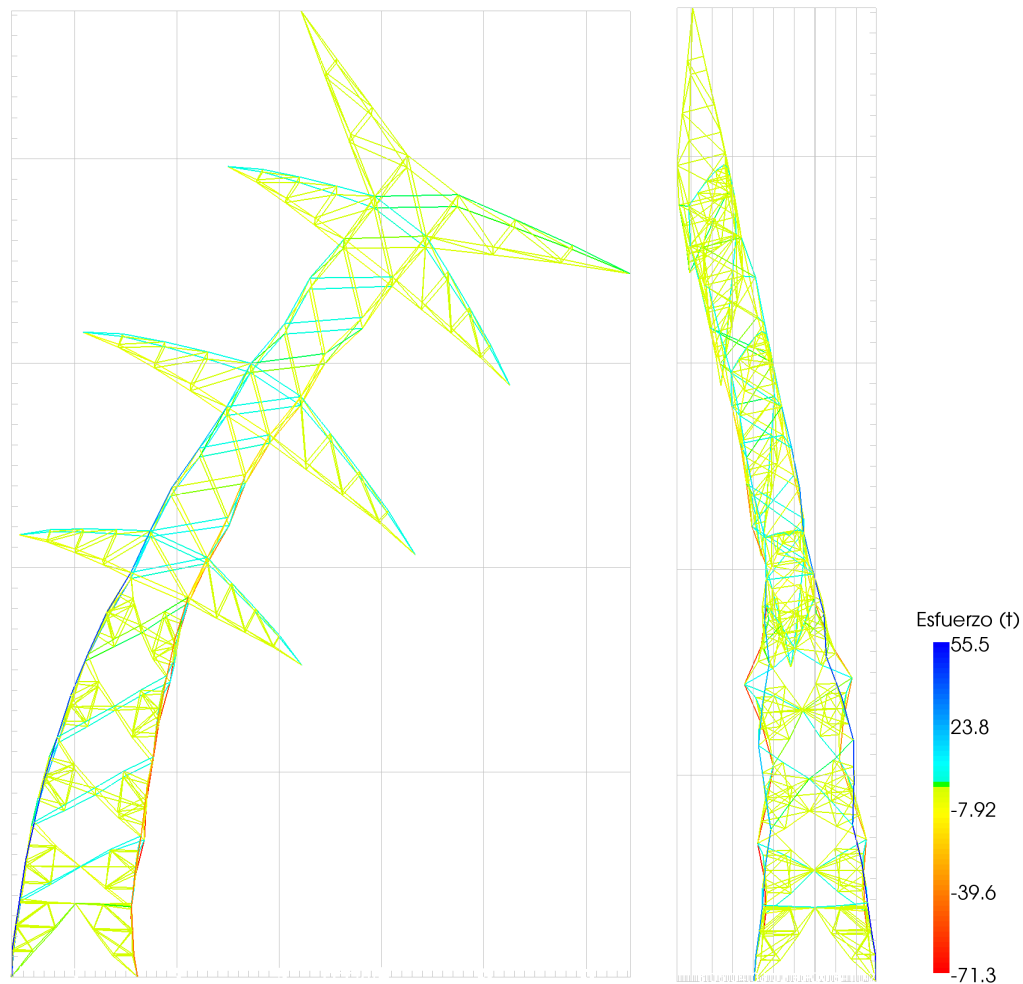


Figura 7.13: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección S.

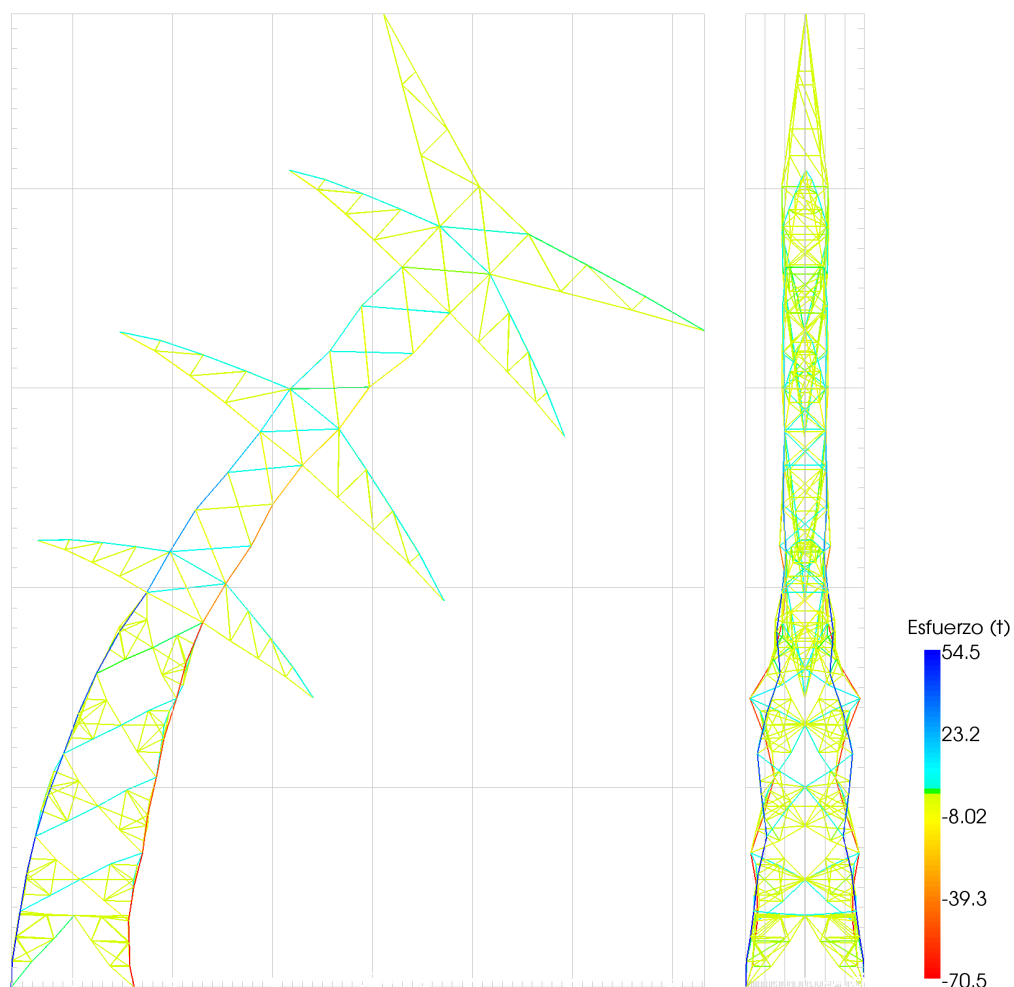


Figura 7.14: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección W.

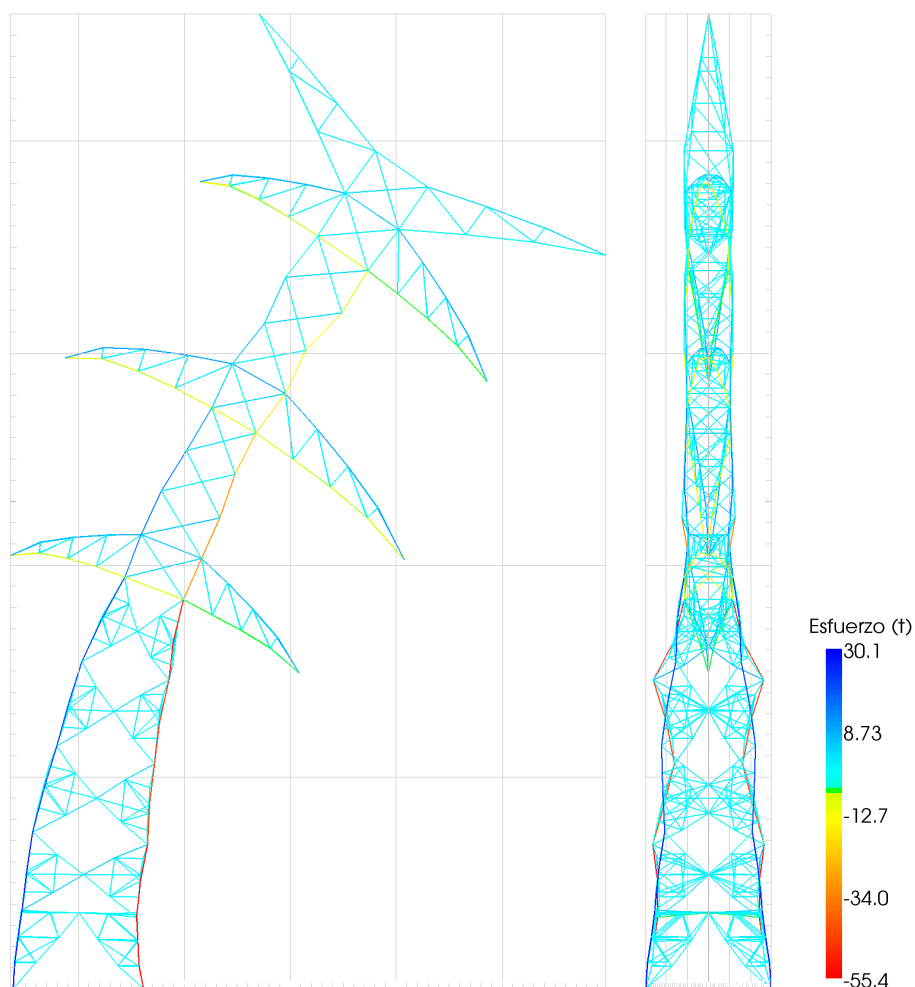


Figura 7.15: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 2.

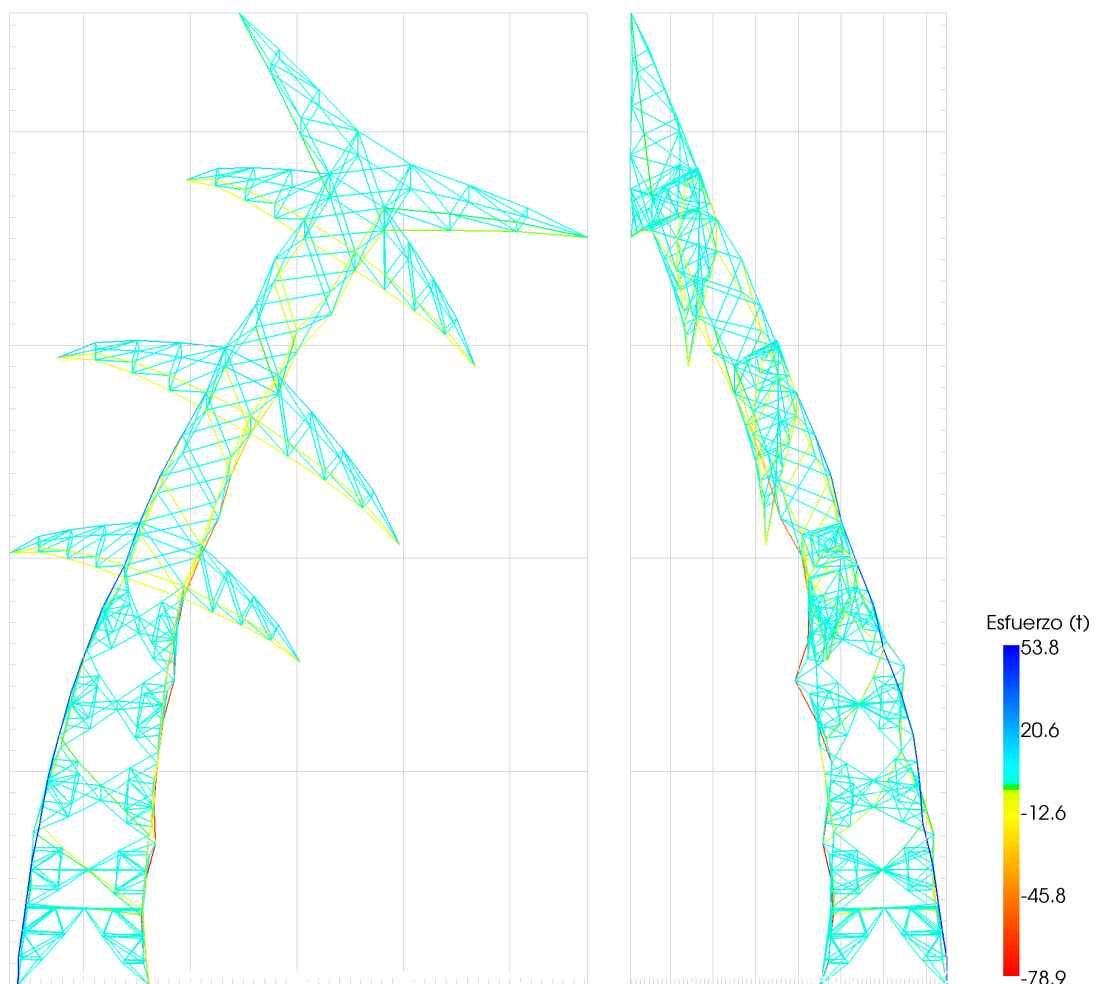


Figura 7.16: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 3.

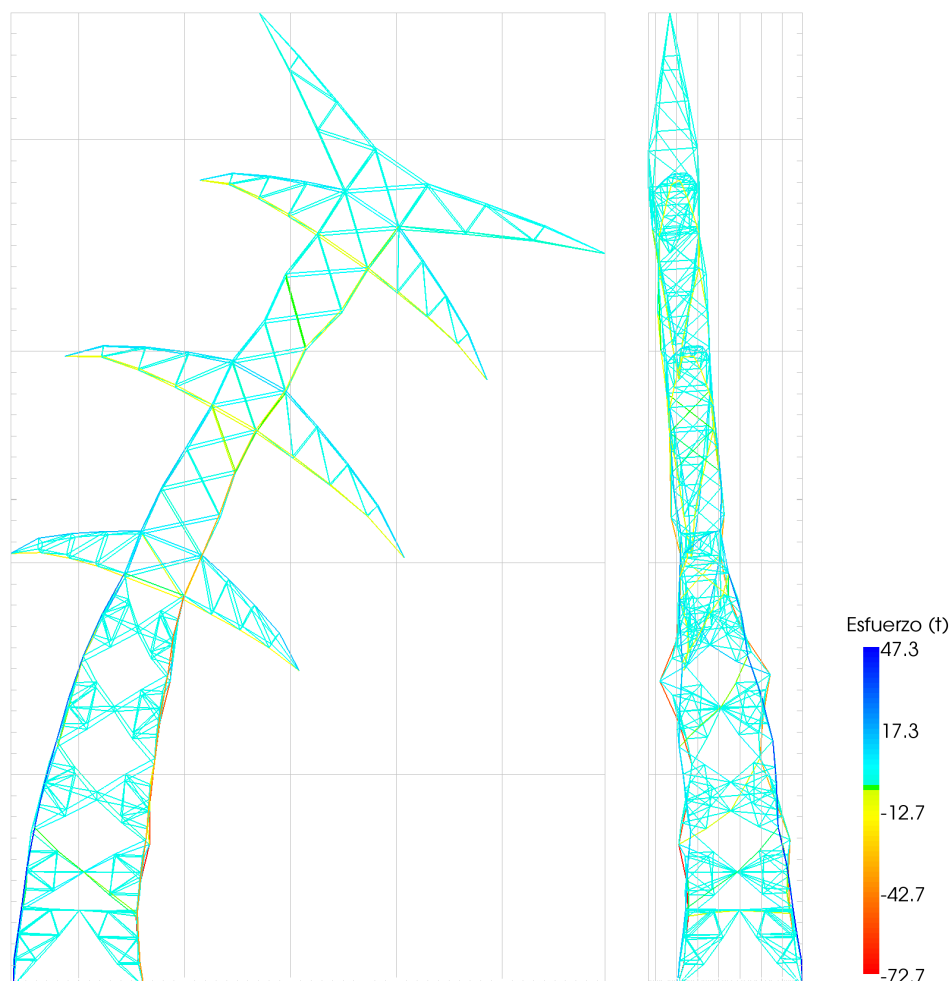


Figura 7.17: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito inferior.

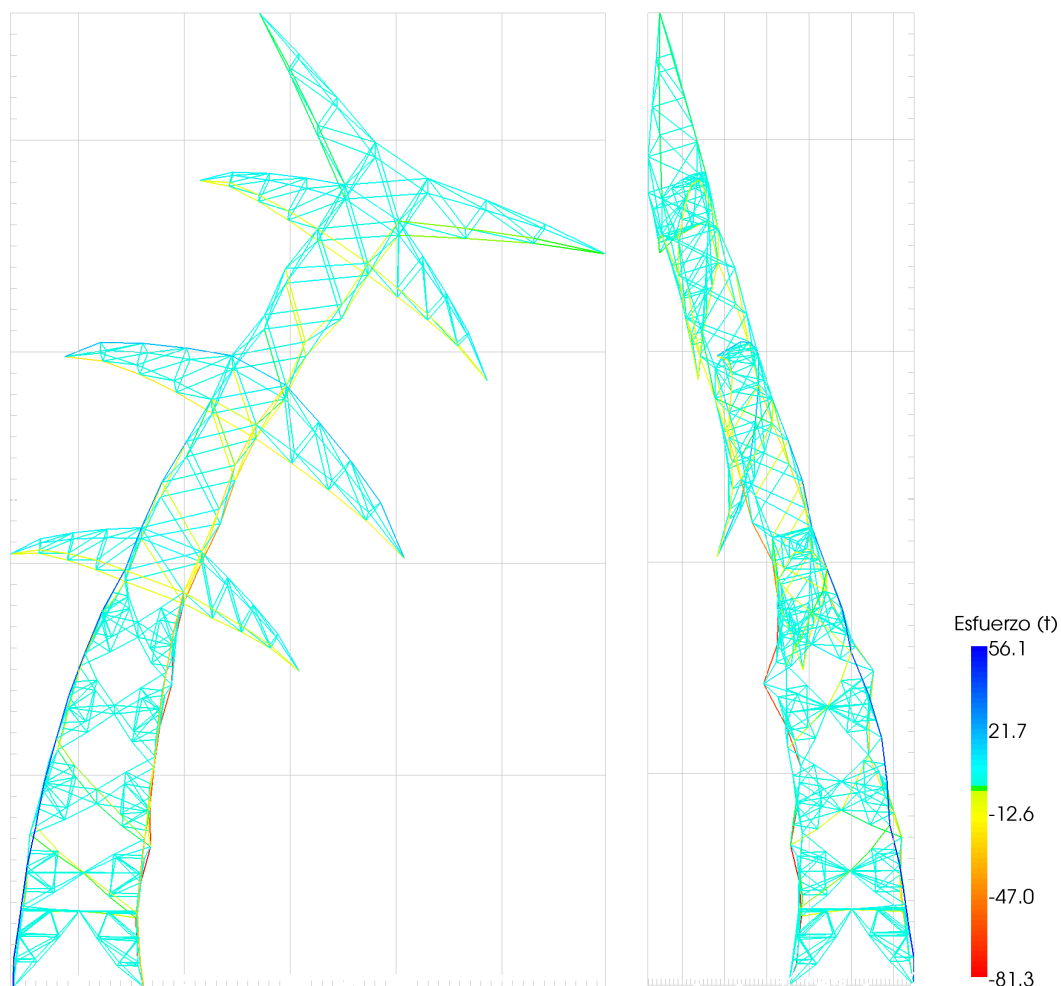


Figura 7.18: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito intermedio.

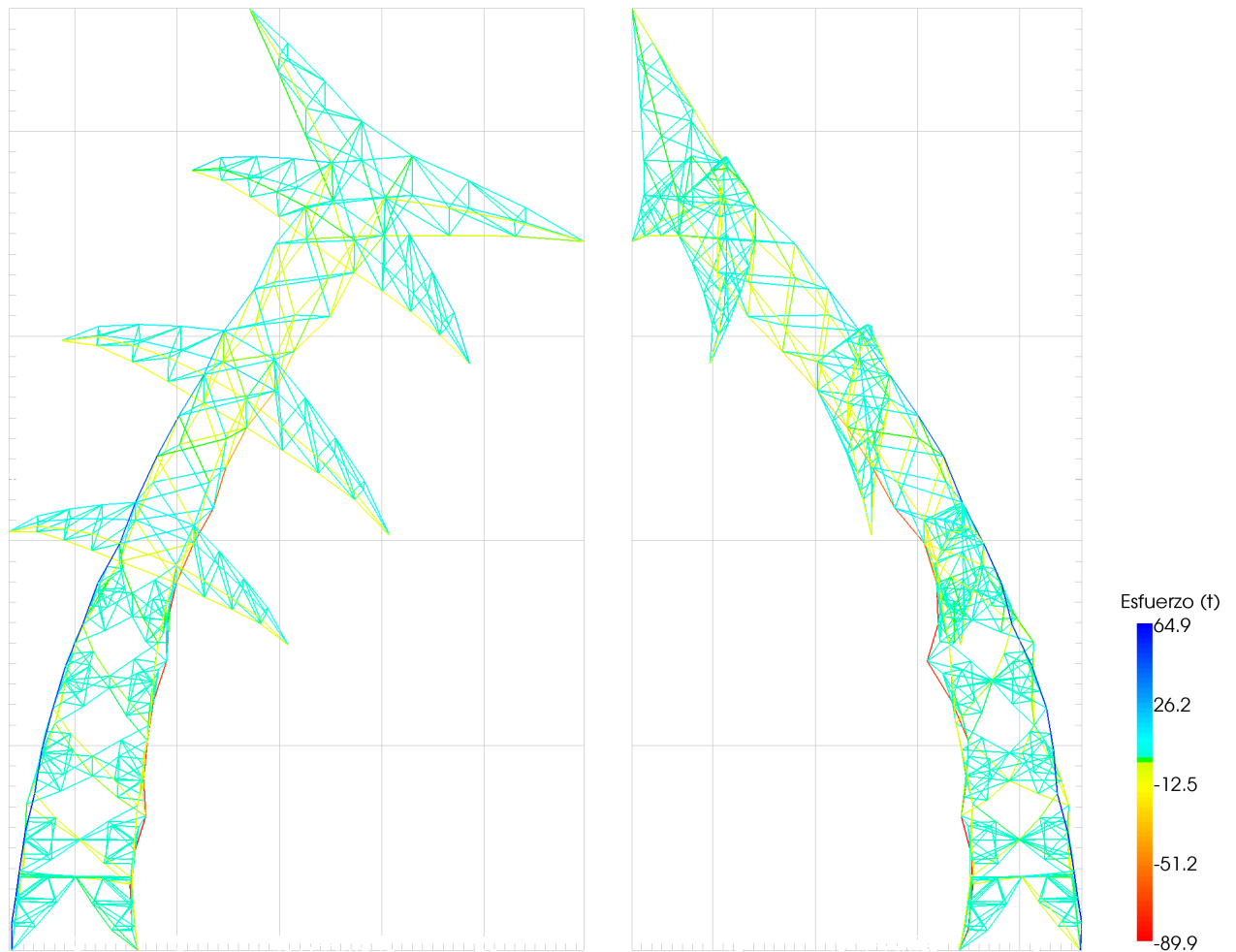


Figura 7.19: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito superior.

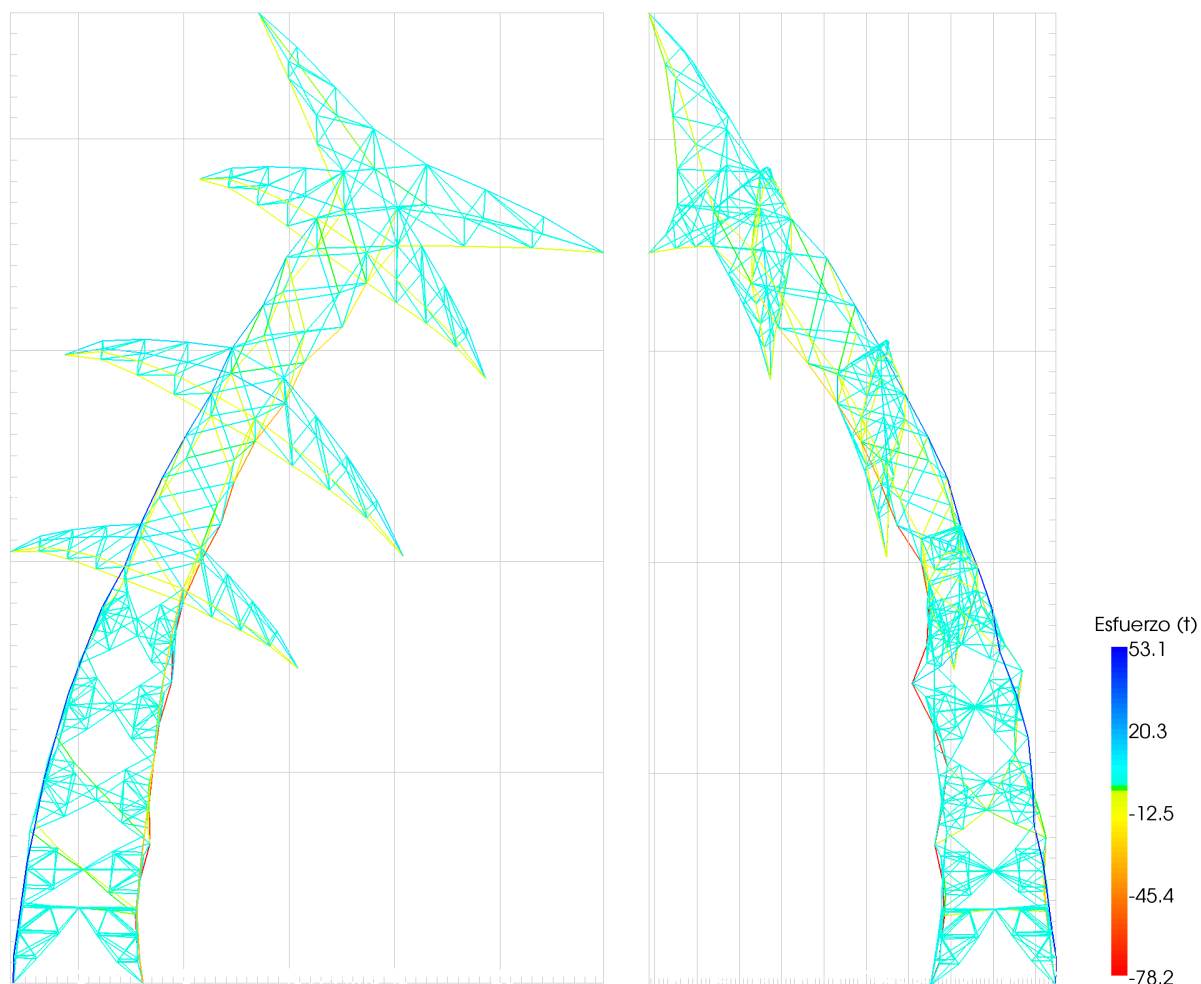


Figura 7.20: Torre de 400 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada a los cables de guarda.

Desde el punto de vista estructural, las barras sometidas a esfuerzos de compresión encuentran su resistencia limitada por su esbeltez, de modo que su longitud admisible es inferior a la de barras traccionadas. Es por ello que en un proceso de optimización de peso, la geometría tiende a incrementar la longitud los elementos situados en la parte superior de la cruceta y a homogeneizar la longitud de los elementos inferiores.

Por otro lado las barras secundarias que componen los bloques tipo X del fuste tienden a reducir su longitud, ya que de ese modo permiten una mayor densidad de carga, incrementando la capacidad resistente de la sección. Si se combinan ambos procesos se obtiene una geometría de fuste entre crucetas como la proporcionada por el algoritmo.

Desde el punto de vista computacional el algoritmo realiza 824 iteraciones para llegar a la convergencia, invirtiendo un tiempo total 7185.31 segundos. En este sentido es dónde el análisis de sensibilidad muestra su mayor utilidad dado que permite una reducción del tiempo total de computación de aproximadamente 2 órdenes de magnitud, tal y como puede comprobarse en la Figura 7.21.

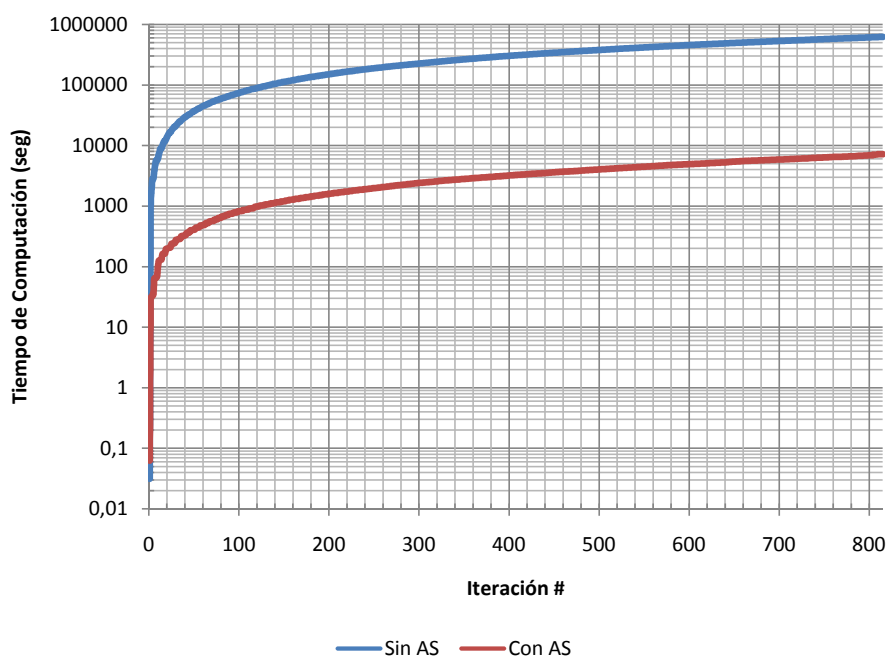


Figura 7.21: Torre de 400 kV: Comparación del tiempo de computación empleado considerando el Análisis de Sensibilidad (AS), o el cálculo directo.

Por otro lado, la temperatura inicial empleada para el estudio se ha obtenido a partir de un análisis de calibración en el que se comprueba cómo se ajustan los valores proporcionados por la expresión definida en el capítulo 6, al mínimo de las pruebas realizadas, tal y como

se puede observar en la Figura 7.22. En dicha figura se puede observar el ajuste entre el valor definido mediante la expresión propuesta en la presente tesis doctoral, y el valor que maximiza el ahorro de peso.

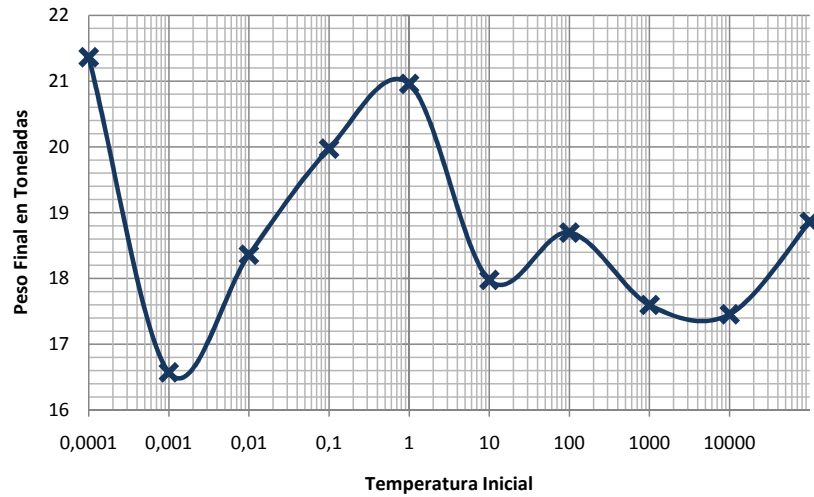


Figura 7.22: Torre de 400 kV: Resultado del algoritmo en función de la temperatura inicial.

En cualquier caso y tal y como puede comprobarse en la Figura 7.23, el algoritmo evoluciona generando una curva similar a la expuesta por White y definida en la Figura 6.8 del capítulo 6.

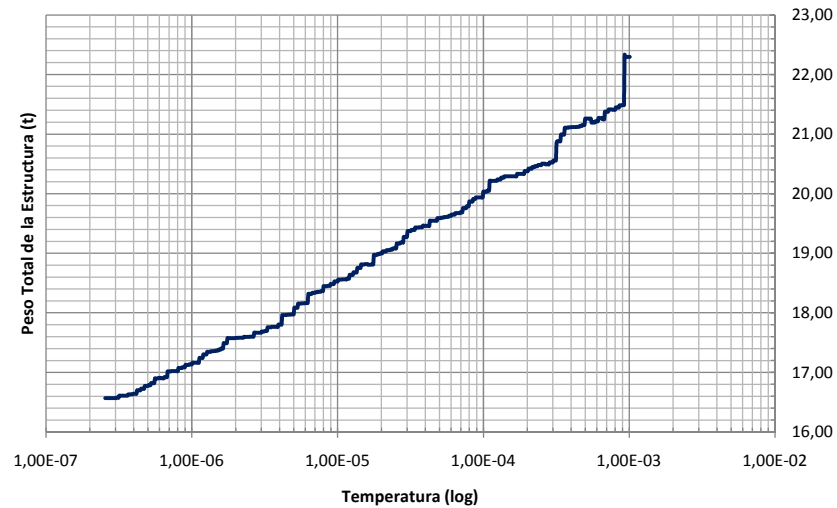


Figura 7.23: Torre de 400 kV: Evolución del algoritmo.

En ella se puede observar cómo la evolución del algoritmo apenas desarrolla un primer

tramo pseudohorizontal. Este tramo tal y como se expuso en el capítulo anterior refleja un comportamiento errático u oscilante característico de una fase inicial de exploración. Sin embargo, el desarrollo de este tipo de ramas incide en un incremento del gasto computacional que en principio no proporciona mejoras significativas. En este sentido, en el ejemplo analizado el algoritmo describe un fuerte descenso inicial que tiende a atenuarse tímidamente conforme se acerca la parada del algoritmo. No obstante, llega a apreciarse un leve cambio de tendencia en el proceso de parada o congelación.

Desde el punto de vista de las restricciones, el resultado proporcionado por el algoritmo muestra una disposición estructural en la que se activan 153 restricciones repartidas en:

- 28 restricciones de esbeltez seccional.
- 72 restricciones de esbeltez elemental.
- 53 restricciones en esfuerzos.

Este hecho confirma el fuerte condicionamiento que sobre el diseño imponen las restricciones en esbeltez. No obstante y tal y como puede observarse en las Figuras 7.24, 7.25 y 7.26, se ha experimentado un incremento generalizado del aprovechamiento, hasta el punto de que el número de restricciones con un valor superior al 80 % pasa a ser el de las restricciones en esfuerzo.

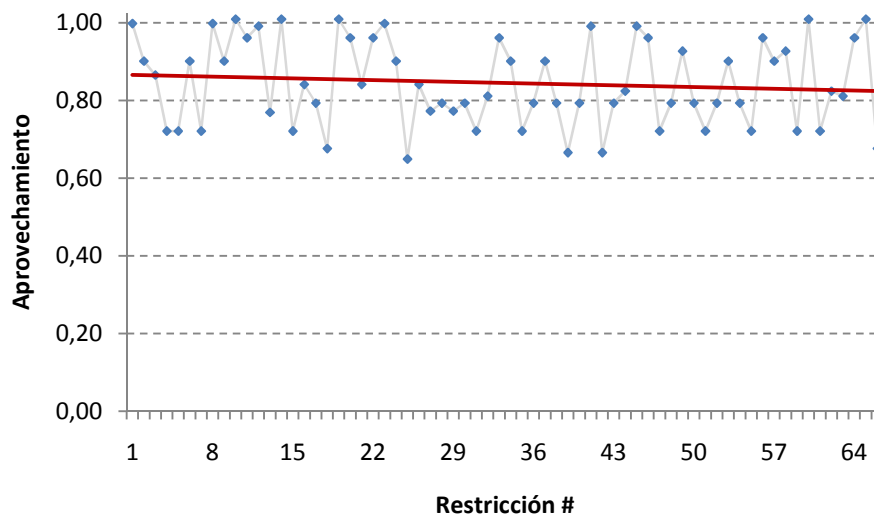


Figura 7.24: Torre de 400 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez seccional.

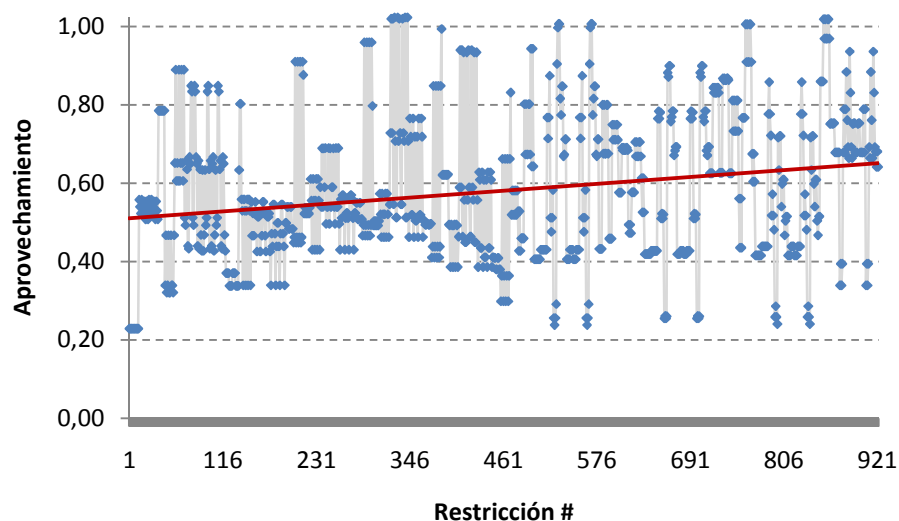


Figura 7.25: Torre de 400 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez elemental.

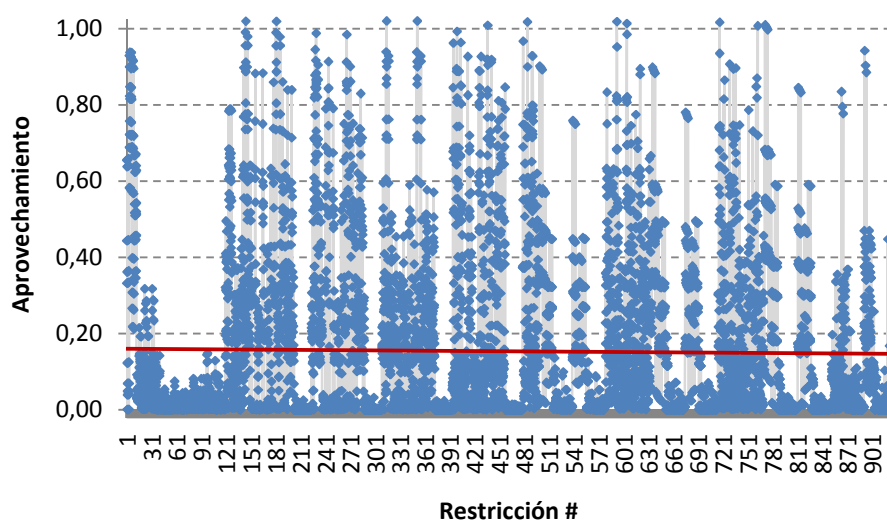


Figura 7.26: Torre de 400 kV: Valor final de las restricciones de esfuerzos.

7.3. Ejemplo de aplicación 2: Torre de 220 kV

El segundo de los ejemplos estudiados corresponde a una estructura de alta tensión para doble circuito de 220 kV o superior con una disposición en capa y un único cable de guarda amarrado en una cúpula simple (Figura 7.27).

La estructura estudiada corresponde con una disposición tipo amarre, capaz de soportar una desviación en ángulo de 15° con una estructura de cableado tipo dúplex. El peso total de



Figura 7.27: Torre de 220 kV: Estructuras de alta tensión similares a la estudiada en el ejemplo de aplicación 2.

esta tipología de torre varía sensiblemente en función de la altura nominal y la funcionalidad del apoyo, pudiendo alcanzar valores de hasta 60 toneladas en los casos más extremos.

7.3.1. Geometría considerada

La estructura de transporte estudiada en este caso, corresponde con una torre de alta tensión de aproximadamente 42 toneladas de peso y una altura total de 65 m. Esta estructura permite un altura libre bajo la cruceta más baja de 43.00 m, hecho que permite salvar vanos de gran longitud.

La estructura se compone mediante una secuencia modular formada por 23 bloques, con las características recogidas en la Tabla 7.7.

De este modo se obtiene una estructura constituida por 267 nodos conectados a través de 829 elementos distribuidos en torno a 77 secciones diferentes de acuerdo con la Figura 7.28. En los archivos adjuntos a esta tesis doctoral, se pueden consultar tanto las coordenadas nodales como la conectividad elemental y la distribución de secciones. En la Tabla 7.8 se adjuntan las características de cada uno de los materiales empleados en el diseño inicial de la estructura.

Módulo	Altura (m)	Cota (m)	Base Inf. X (m)	Base Inf. Y (m)	Base Sup. X (m)	Base Sup. Y (m)	Long. ala (m)	Altura alas (m)
1 K	7.000	7.000	10.80	10.80	9.20	9.20	—	—
2 X Arriostrada	7.000	14.000	9.20	9.20	7.80	7.80	—	—
3 X Arriostrada	10.000	24.000	7.80	7.80	5.80	5.80	—	—
4 X Arriostrada	7.000	31.000	5.80	5.80	4.40	4.40	—	—
5 X	2.000	33.000	4.40	4.40	4.00	4.00	—	—
6 X	2.000	35.000	4.00	4.00	3.60	3.60	—	—
7 X	2.000	37.000	3.60	3.60	3.20	3.20	—	—
8 X	2.000	39.000	3.20	3.20	2.80	2.80	—	—
9 X	2.000	41.000	2.80	2.80	2.40	2.40	—	—
10 Súper X	2.000	43.000	2.40	2.40	2.00	2.00	—	—
11 Cruceta Corta	1.625	44.625	2.00	2.00	2.00	2.00	5.20	—
12 X	1.625	46.250	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—
13 X	1.625	47.875	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—
14 Súper X	1.625	49.500	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—
15 Cruceta Larga	1.625	51.125	2.00	2.00	2.00	2.00	6.45	—
16 X	1.625	52.750	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—
17 X	1.625	54.375	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—
18 Súper X	1.625	56.000	2.00	2.00	2.00	2.00	—	—
19 Cruceta Corta	1.625	57.625	2.00	2.00	2.00	2.00	5.20	—
20 Súper Lambda	1.842	59.467	2.00	2.00	1.50	1.50	—	—
21 Súper Lambda	1.842	61.309	1.50	1.50	1.00	1.00	—	—
22 Súper Lambda	1.842	63.151	1.00	1.00	0.50	0.50	—	—
23 Cúpula	1.842	64.993	0.50	0.50	0.00	0.00	—	—

Tabla 7.7: Torre de 220 kV: Listado de Módulos que componen la estructura.

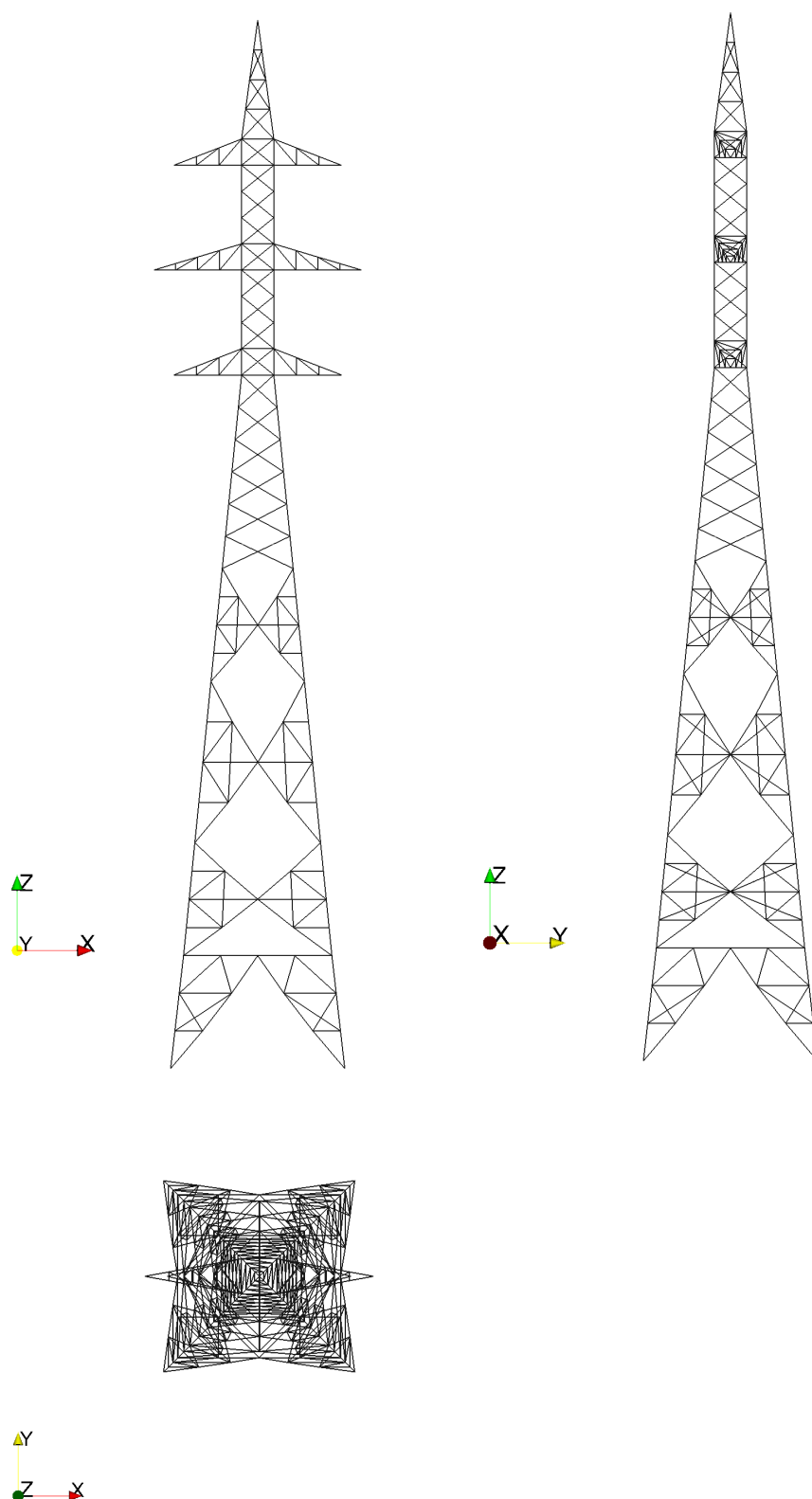


Figura 7.28: Torre de 220 kV: Geometría de la torre analizada.

Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
1	L250.20	96.00	2304.00	40	L70.7	9.31	17.15
2	L120.10	23.00	126.74	41	L90.8	13.76	42.40
3	L120.10	23.00	126.74	42	L150.12	34.56	298.60
4	L120.10	23.00	126.74	43	L90.8	13.76	42.40
5	L100.10	19.00	71.45	44	L150.12	34.56	298.60
6	L100.10	19.00	71.45	45	L90.8	13.76	42.40
7	L120.10	23.00	126.74	46	L120.10	23.00	126.74
8	L250.20	96.00	2304.00	47	L90.8	13.76	42.40
9	L120.10	23.00	126.74	48	L90.8	13.76	42.40
10	L120.10	23.00	126.74	49	L120.10	23.00	126.74
11	L150.16	45.44	381.77	50	L90.8	13.76	42.40
12	L180.16	55.04	678.46	51	L90.8	13.76	42.40
13	L250.20	96.00	2304.00	52	L90.8	13.76	42.40
14	L120.10	23.00	126.74	53	L70.7	9.31	17.15
15	L120.10	23.00	126.74	54	L70.7	9.31	17.15
16	L120.10	23.00	126.74	55	L120.10	23.00	126.74
17	L150.16	45.44	381.77	56	L80.6	9.24	22.83
18	L200.20	76.00	1143.17	57	L120.10	23.00	126.74
19	L120.10	23.00	126.74	58	L80.6	9.24	22.83
20	L90.8	13.76	42.40	59	L120.10	23.00	126.74
21	L90.8	13.76	42.40	60	L80.6	9.24	22.83
22	L120.10	23.00	126.74	61	L90.8	13.76	42.40
23	L150.18	50.76	420.48	62	L120.10	23.00	126.74
24	L120.10	23.00	126.74	63	L70.7	9.31	17.15
25	L150.18	50.76	420.48	64	L90.8	13.76	42.40
26	L120.10	23.00	126.74	65	L70.7	9.31	17.15
27	L150.18	50.76	420.48	66	L70.7	9.31	17.15
28	L120.10	23.00	126.74	67	L60.6	6.84	9.26
29	L150.18	50.76	420.48	68	L80.6	9.24	22.83
30	L120.10	23.00	126.74	69	L70.7	9.31	17.15
31	L150.18	50.76	420.48	70	L60.6	6.84	9.26
32	L120.10	23.00	126.74	71	L80.6	9.24	22.83
33	L150.18	50.76	420.48	72	L70.7	9.31	17.15
34	L120.10	23.00	126.74	73	L60.6	6.84	9.26
35	L90.8	13.76	42.40	74	L80.6	9.24	22.83
36	L150.18	50.76	420.48	75	L70.7	9.31	17.15
37	L90.8	13.76	42.40	76	L60.6	6.84	9.26
38	L90.8	13.76	42.40	77	L80.6	9.24	22.83
39	L70.7	9.31	17.15				

Tabla 7.8: Torre de 220 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría.

En la Figura 7.29 se puede observar una mayor concentración de material en los montantes de la estructura así como en los perfiles principales de cada una de las alas.

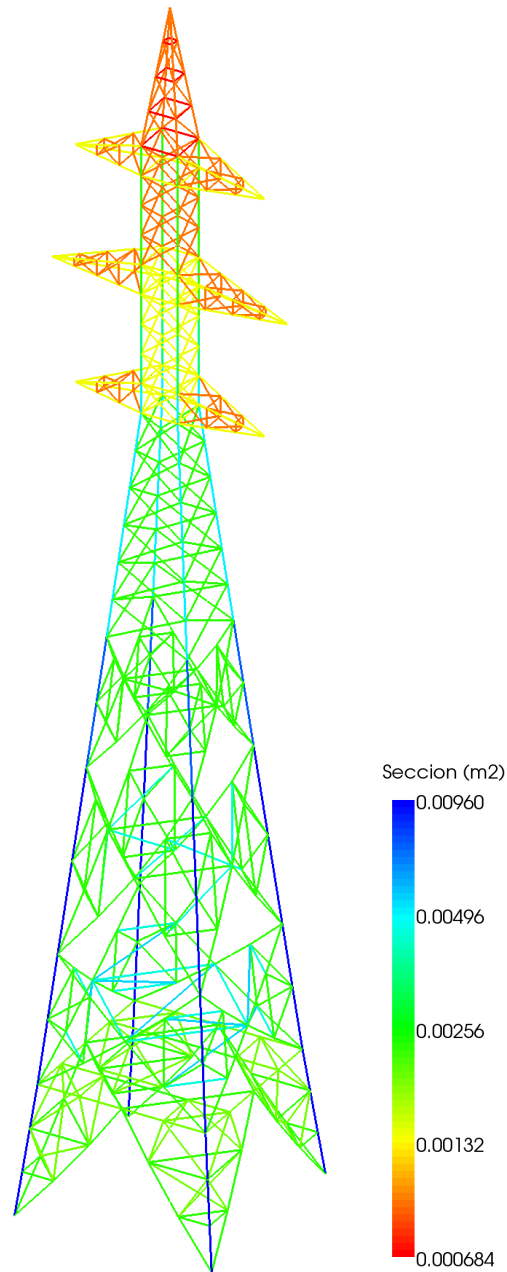


Figura 7.29: Torre de 220 kV: Distribución de material dentro la estructura.

7.3.2. Cargas Actuantes

De acuerdo con los datos disponibles de los catálogos de empresas fabricantes, las cargas máximas admisibles para una estructura como la estudiada se recogen en la Tabla 7.9. Estas cargas se ajustan al esquema resistente recogido en la Figura 7.30, de forma que todas ellas se aplican simétricamente, salvo en el caso de la 4ª hipótesis de carga.

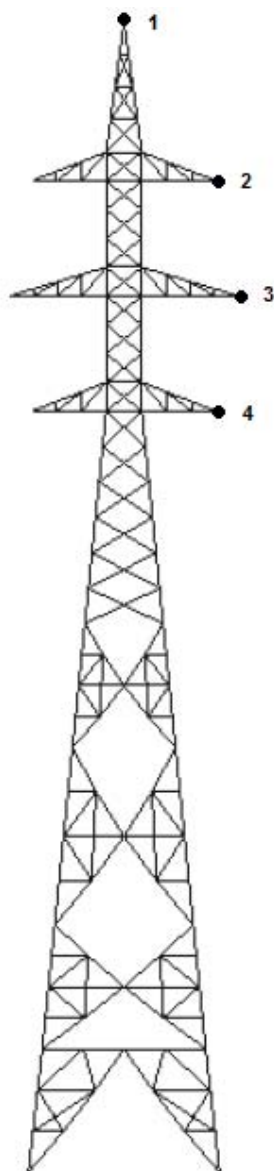


Figura 7.30: Torre de 220 kV: Sistema de cableado elegido.

Cable	Hipótesis	Carga		
		Longitudinal (T)	Vertical (T)	Transversal (T)
1	1 ^a	0.000	−0.546	1.231
	2 ^a	0.000	−1.462	1.353
	3 ^a	1.037	−1.462	0.947
	4.1 ^a	4.148	−1.462	1.083
	4.2 ^a	0.000	−1.462	1.083
	4.3 ^a	0.000	−1.462	1.083
	4.4 ^a	0.000	−1.462	1.083
2	1 ^a	0.000	−1.748	3.636
	2 ^a	0.000	−4.023	3.411
	3 ^a	2.662	−4.023	2.432
	4.1 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.2 ^a	5.323	−4.023	2.779
	4.3 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.4 ^a	0.000	−4.023	2.779
3	1 ^a	0.000	−1.748	3.636
	2 ^a	0.000	−4.023	3.411
	3 ^a	2.662	−4.023	2.432
	4.1 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.2 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.3 ^a	5.323	−4.023	2.779
	4.4 ^a	0.000	−4.023	2.779
4	1 ^a	0.000	−1.748	3.636
	2 ^a	0.000	−4.023	3.411
	3 ^a	2.662	−4.023	2.432
	4.1 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.2 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.3 ^a	0.000	−4.023	2.779
	4.4 ^a	5.323	−4.023	2.779

Tabla 7.9: Torre de 220 kV: Cargas en toneladas sobre cada uno de los puntos de amarre de los conductores para las diferentes hipótesis de carga consideradas.

7.3.3. Estado Inicial de las Restricciones

Tras estudiar los principales datos de entrada del problema, debe estudiarse el estado de la situación inicial desde el punto de vista de las restricciones. En las Figuras 7.31, 7.32

y 7.33, se puede observar el estado de las restricciones de esbeltez seccional, elemental y de esfuerzos, respectivamente.

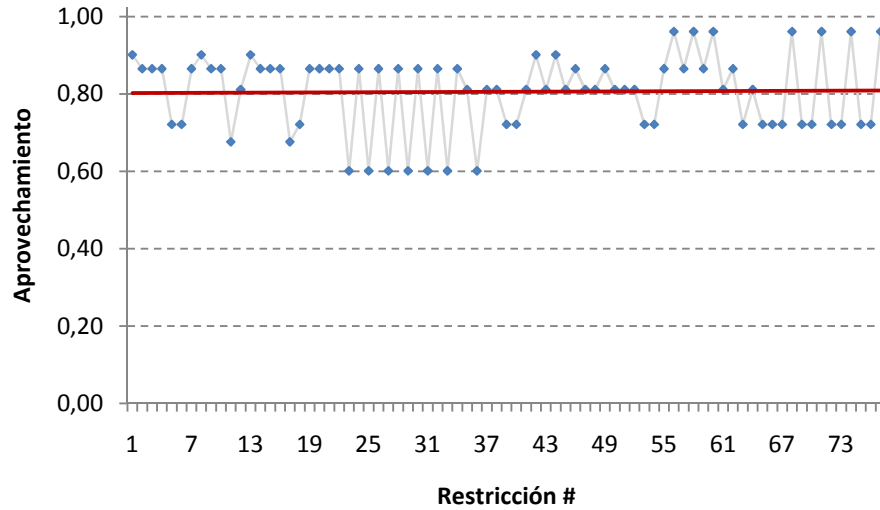


Figura 7.31: Torre de 220 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez seccional.

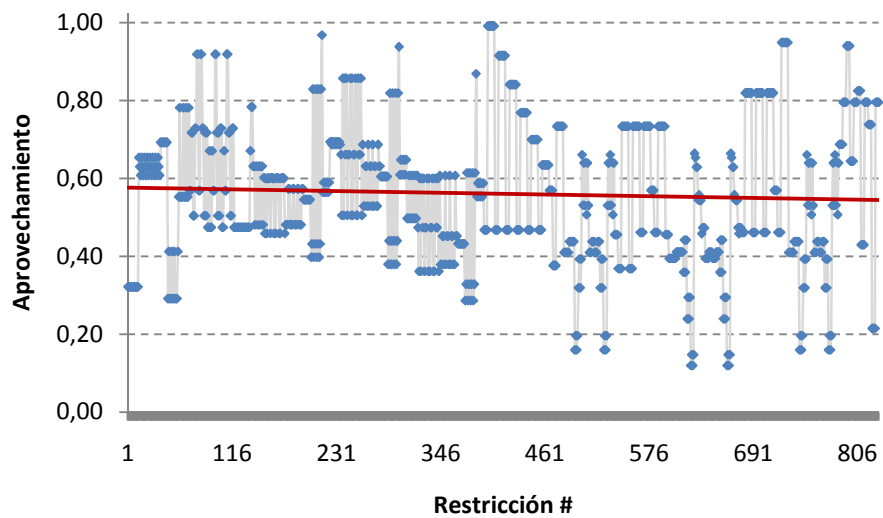


Figura 7.32: Torre de 220 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez elemental.

En total la solución inicial muestra 50 restricciones activas, que se distribuyen entre esbeltez seccional y elemental:

- 12 restricciones de esbeltez seccional.

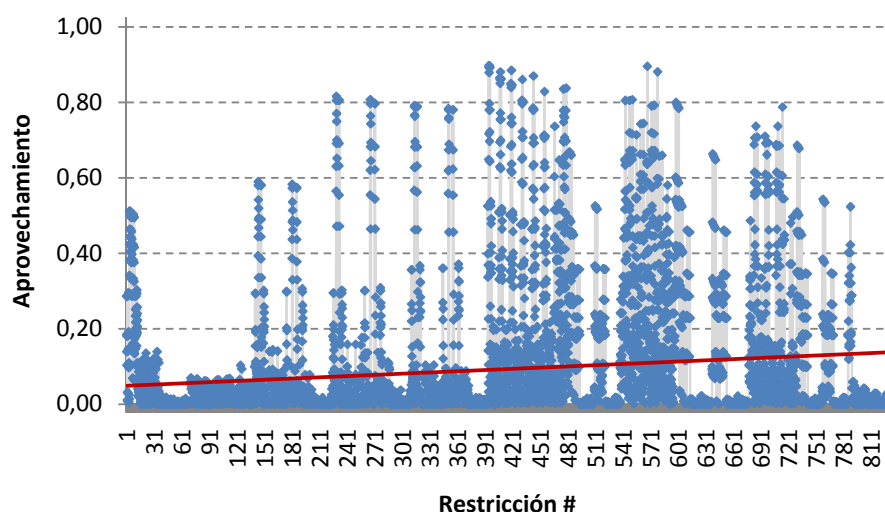


Figura 7.33: Torre de 220 kV: Valor inicial de las restricciones de esfuerzos.

- 38 restricciones de esbeltez elemental.
- 0 restricciones en esfuerzos.

No obstante, y a pesar de que parece que los esfuerzos no son significativamente relevantes en el condicionamiento del diseño inicial, un análisis más exhaustivo muestra cómo la geometría y la distribución seccional proporcionan un elevado número de restricciones en esfuerzo con un aprovechamiento superior al 80 %.

- 51 restricciones de esbeltez seccional.
- 91 restricciones de esbeltez elemental.
- 37 restricciones en esfuerzos.

En cualquier caso, el hecho de que las restricciones en esfuerzo no se encuentren activas se debe al carácter discreto de las secciones. Debido a los escalones seccionales que existen en el catalogo comercial resulta razonable considerar que los valores de restricción en esfuerzo sufran un cierto escalonamiento. Este hecho en particular, en ciertos casos, puede llevar a que parte de las restricciones que estén próximas a activarse, lleguen a restringirse en el momento en el que se produce un cambio seccional.

7.3.4. Resultados de la Optimización

La aplicación del algoritmo sobre el ejemplo de aplicación 2 proporciona una configuración de torre en la que el ahorro de material alcanza un 19,85 %. El proceso de optimización

emplea un total de 984 iteraciones con un coste computacional de 8963.49 segundos. En la Tabla 7.10 se resumen las principales características del proceso de optimización:

RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA EVOLUCIÓN DE LA TORRE DE 220kV	
Nº de Materiales	77
Nº de Elementos	829
Nº Total de Variables	200
Nº de Restricciones	9128
Peso Inicial (t)	42.605
Peso Final (t)	34.148
Porcentaje de Reducción	19.848
Nº de Iteraciones Totales	984
Iteración del Máximo	973
Tiempo de Computación Empleado (s)	8963.49
Temperatura Inicial	0.10e-02
Temperatura Final	0.51e-07

Tabla 7.10: Torre de 220 kV: Resumen de las principales características del algoritmo.

Antes de exponer en profundidad los detalles de la solución obtenida, cabe destacar el elevado número de variables discretas que intervienen en el problema. Las 77 secciones presentes en la estructura, suponen un total de 154 variables discretas, número muy superior al total de variables geométricas continuas del modelo (46). Por otro lado, los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo propuesto en la presente tesis, a la estructura del ejemplo 2, proporcionan un reparto de material como el que puede observarse en la Figura 7.34 y en la Tabla 7.11. Del mismo modo, la geometría obtenida como resultado del proceso de optimización se adjunta tanto en la Figura 7.35 como en la Tabla 7.12.

Al igual que en el ejemplo anterior, el resultado de la optimización alcanzado estiliza la geometría de la estructura. Se observa como los fustes tienden a adelgazarse de forma generalizada para incrementar su longitud en el contacto con las crucetas. Del mismo modo en el reparto seccional se aprecia que el algoritmo redistribuye el grueso de material hacia los montantes y barras principales, siendo las barras redundantes las que menor sección de material llevan asociadas.

Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
1	L200.18	68.76	1045.18	40	L60.6	6.84	9.25
2	L100.8	15.36	58.98	41	L90.8	13.76	42.40
3	L80.8	12.16	29.26	42	L150.12	34.56	298.59
4	L100.10	19.00	71.44	43	L90.7	12.11	37.75
5	L110.8	16.96	79.40	44	L150.12	34.56	298.59
6	L90.9	15.39	46.87	45	L75.8	11.36	23.86
7	L120.10	23.00	126.73	46	L120.10	23.00	126.73
8	L250.20	96.00	2304.00	47	L90.8	13.76	42.40
9	L100.8	15.36	58.98	48	L90.8	13.76	42.40
10	L70.5	6.75	12.81	49	L120.10	23.00	126.73
11	L150.16	45.44	381.77	50	L90.7	12.11	37.75
12	L180.16	55.04	678.45	51	L70.5	6.75	12.81
13	L250.20	96.00	2304.00	52	L90.8	13.76	42.40
14	L100.10	19.00	71.44	53	L50.5	4.75	4.46
15	L120.10	23.00	126.73	54	L45.5	4.25	3.19
16	L100.8	15.36	58.98	55	L110.10	21.00	96.46
17	L150.16	45.44	381.77	56	L80.6	9.24	22.82
18	L200.17	65.11	994.88	57	L110.10	21.00	96.46
19	L100.8	15.36	58.98	58	L80.6	9.24	22.82
20	L100.10	19.00	71.44	59	L100.8	15.36	58.98
21	L70.5	6.75	12.81	60	L80.6	9.24	22.82
22	L100.8	15.36	58.98	61	L90.8	13.76	42.40
23	L160.16	48.64	468.24	62	L80.6	9.24	22.82
24	L120.10	23.00	126.73	63	L70.7	9.31	17.15
25	L150.18	50.76	420.48	64	L90.7	12.11	37.75
26	L120.10	23.00	126.73	65	L50.5	4.75	4.46
27	L160.16	48.64	468.24	66	L70.7	9.31	17.15
28	L100.10	19.00	71.44	67	L50.5	4.75	4.46
29	L160.16	48.64	468.24	68	L70.5	6.75	12.81
30	L120.10	23.00	126.73	69	L70.7	9.31	17.15
31	L160.16	48.64	468.24	70	L60.6	6.84	9.25
32	L120.10	23.00	126.73	71	L70.5	6.75	12.81
33	L160.16	48.64	468.24	72	L75.6	8.64	18.66
34	L120.10	23.00	126.73	73	L70.5	6.75	12.81
35	L90.7	12.11	37.75	74	L70.5	6.75	12.81
36	L150.18	50.76	420.48	75	L60.6	6.84	9.25
37	L80.6	9.24	22.82	76	L40.3	2.31	1.42
38	L80.8	12.16	29.26	77	L70.6	8.04	15.03
39	L45.5	4.25	3.19				

Tabla 7.11: Torre de 220 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría final.

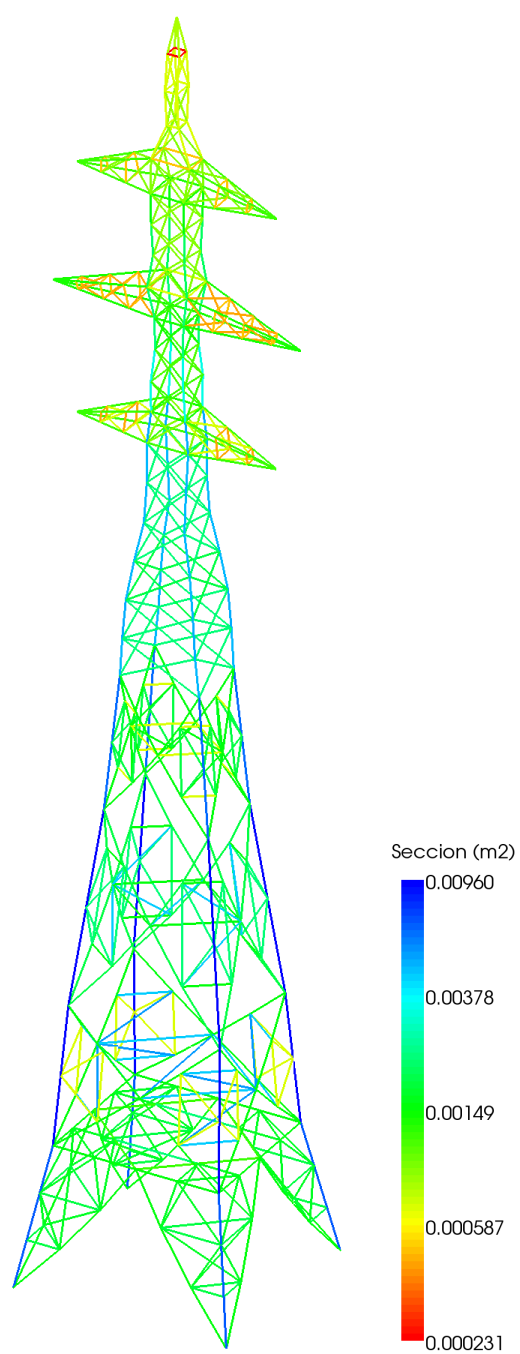


Figura 7.34: Torre de 220 kV: Distribución final de material en la estructura.

Módulo	Altura (m)	Base Inf. X (m)	Base Inf. Y (m)	Base Sup. X (m)	Base Sup. Y (m)	Long. ala (m)	Altura alas (m)
1 K	7.000	11.01	10.25	8.59	7.38	—	—
2 X Arriostrada	7.000	8.59	7.38	7.93	5.92	—	—
3 X Arriostrada	10.000	7.93	5.92	5.47	3.78	—	—
4 X Arriostrada	7.000	5.47	3.78	4.09	3.18	—	—
5 X	2.000	4.09	3.18	3.75	3.31	—	—
6 X	2.000	3.75	3.31	3.42	3.16	—	—
7 X	2.000	3.42	3.16	2.93	2.68	—	—
8 X	2.000	2.93	2.68	2.11	2.32	—	—
9 X	2.000	2.11	2.32	1.98	1.89	—	—
10 Súper X	2.000	1.98	1.89	2.09	1.65	—	—
11 Cruceta Corta	1.625	2.09	1.65	1.82	1.59	5.20	—
12 X	1.625	1.82	1.59	1.62	1.74	—	—
13 X	1.625	1.62	1.74	1.41	1.48	—	—
14 Súper X	1.625	1.41	1.48	1.56	1.45	—	—
15 Cruceta Larga	1.625	1.56	1.45	2.03	1.72	6.45	—
16 X	1.625	2.03	1.72	1.58	1.42	—	—
17 X	1.625	1.58	1.42	1.70	1.68	—	—
18 Súper X	1.625	1.70	1.68	1.77	1.71	—	—
19 Cruceta Corta	1.625	1.77	1.71	1.96	1.07	5.20	—
20 Súper Lambda	1.842	1.96	1.07	0.61	0.78	—	—
21 Súper Lambda	1.842	0.61	0.78	0.69	0.99	—	—
22 Súper Lambda	1.842	0.69	0.99	0.65	0.69	—	—
23 Cúpula	1.842	0.65	0.69	0.00	0.00	—	—

Tabla 7.12: Torre de 220 kV: Valores de las variables geométricas para la solución.

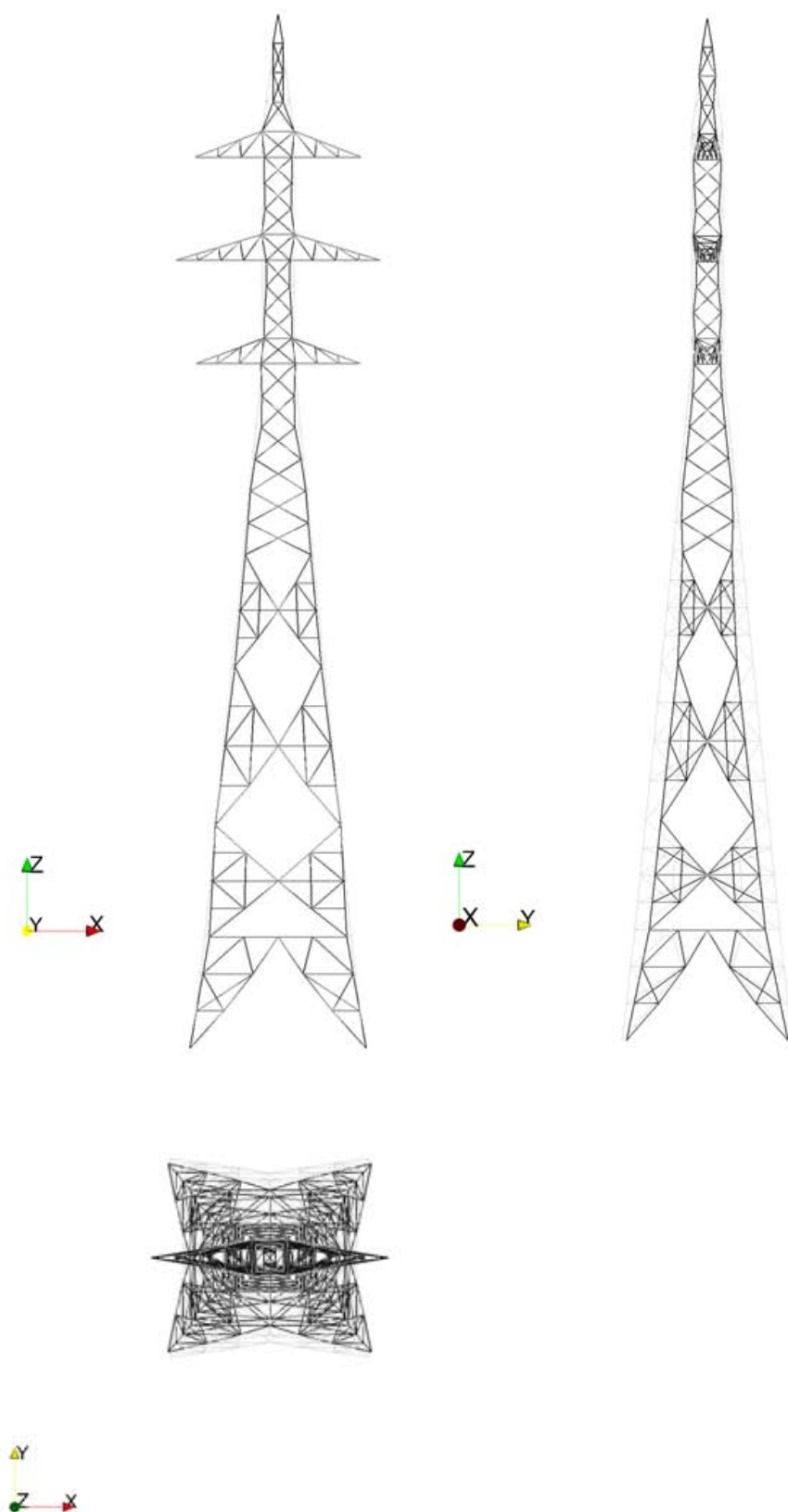


Figura 7.35: Torre de 220 kV: Geometría de la solución obtenida para la torre analizada.

En este sentido cabe resaltar como las barras de mayor sección no coinciden con los montantes del módulo base, sino que corresponden con las barras de los módulos tipo X arriostrada. Este hecho se debe a la mayor longitud que los montantes poseen en dichos módulos, lo que incrementa considerablemente su esbeltez y condiciona el problema tanto desde el punto de vista de la restricción en esbeltez elemental como desde el punto de vista de la restricción en esfuerzo de compresión por los efectos del pandeo. Este hecho es indicativo de un dimensionamiento deficiente de los bloques que componen la estructura, dado que la reorganización de tales magnitudes permitiría una mayor reducción y racionalización del peso total de la estructura. En la Figura 7.36 se puede consultar la envolvente de los esfuerzos obtenida del análisis estructural de la torre.

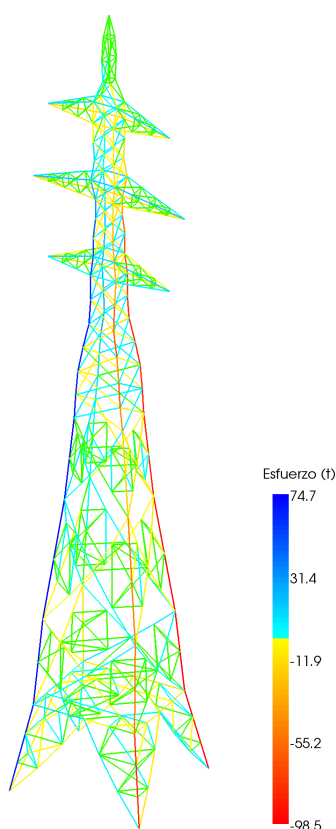


Figura 7.36: Torre de 220 kV: Envolvente de los esfuerzos obtenidos.

El comportamiento estructural de la solución obtenida ante cada una de las hipótesis de carga estudiada se adjunta en las Figuras 7.37 a 7.46.

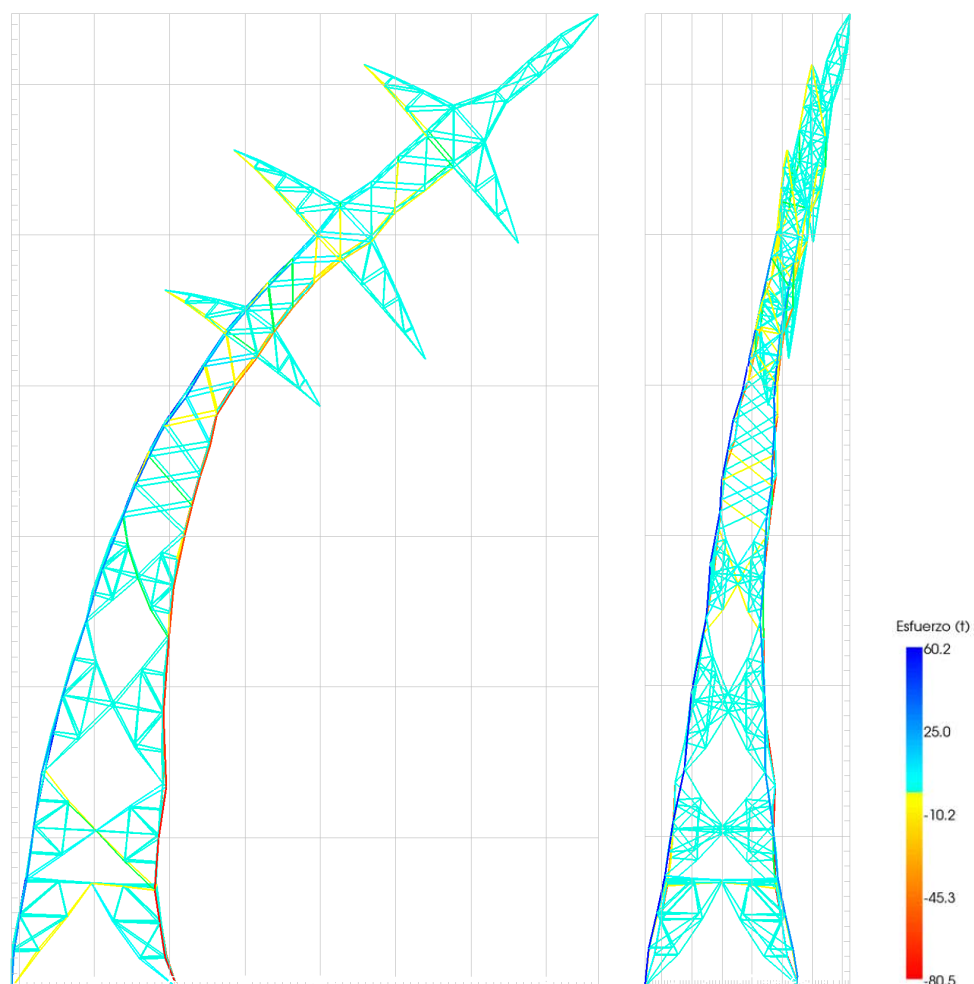


Figura 7.37: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección N.

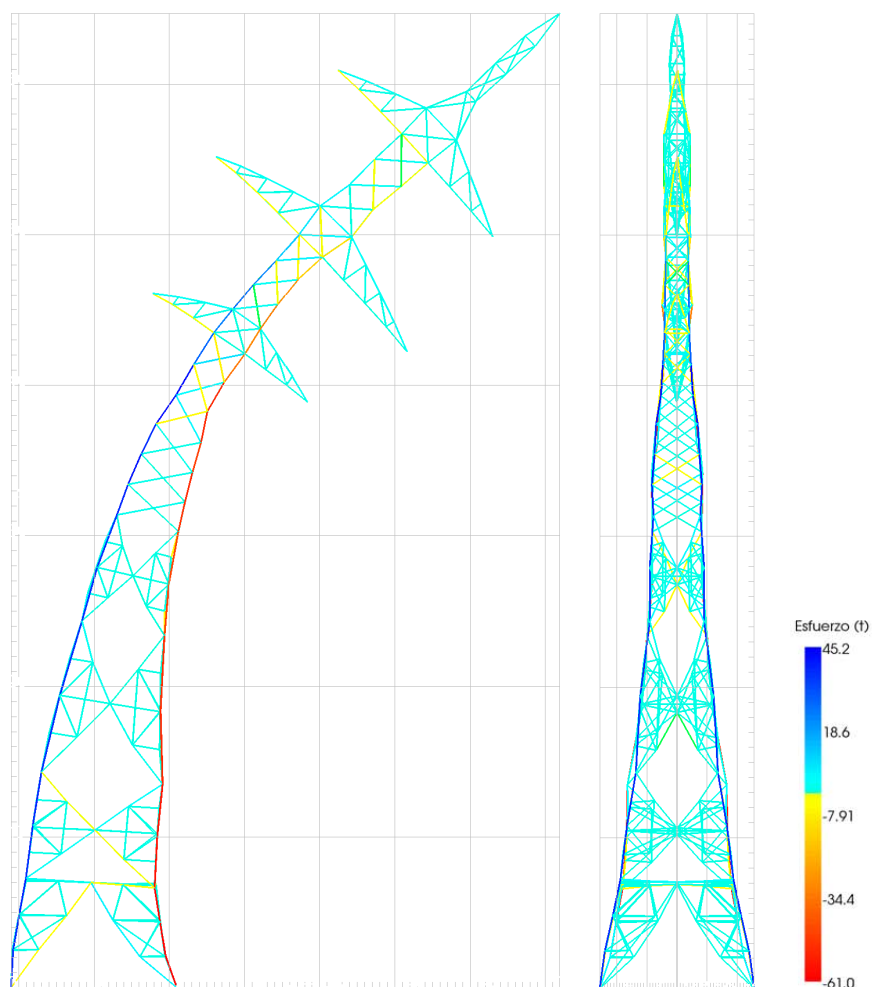


Figura 7.38: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección E.

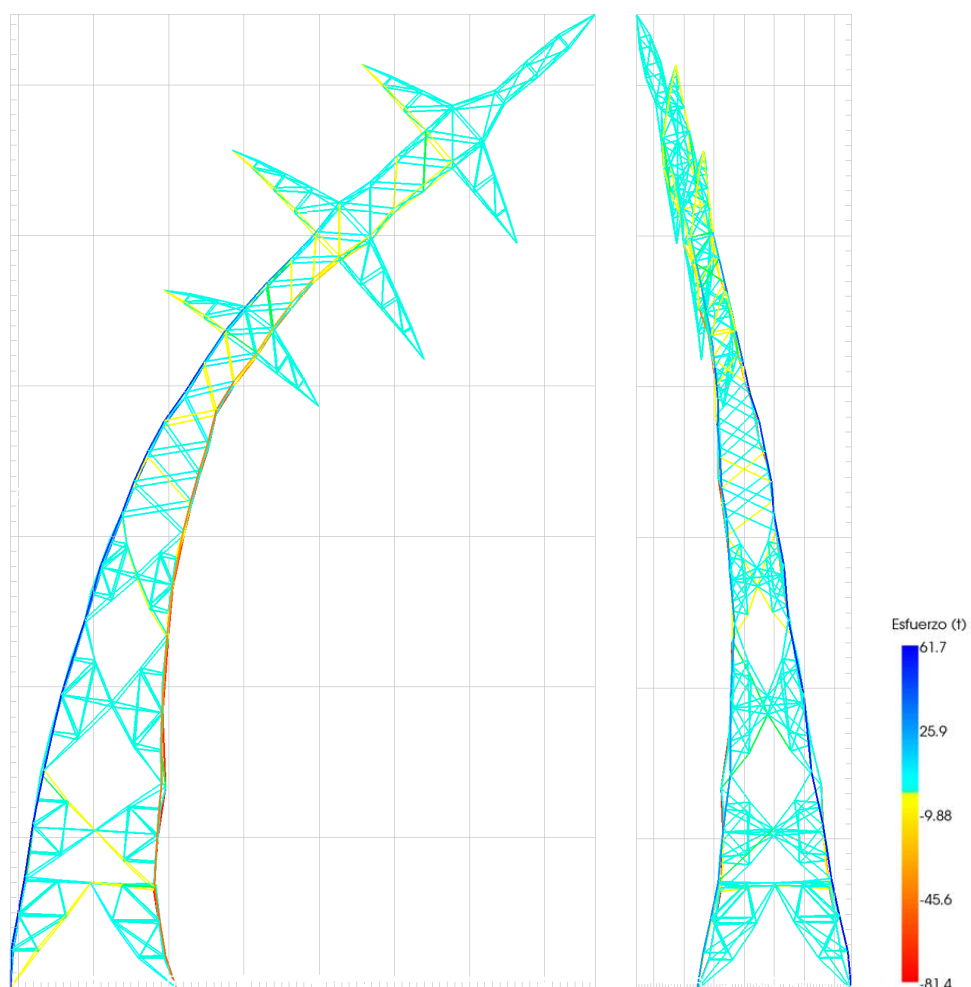


Figura 7.39: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección S.

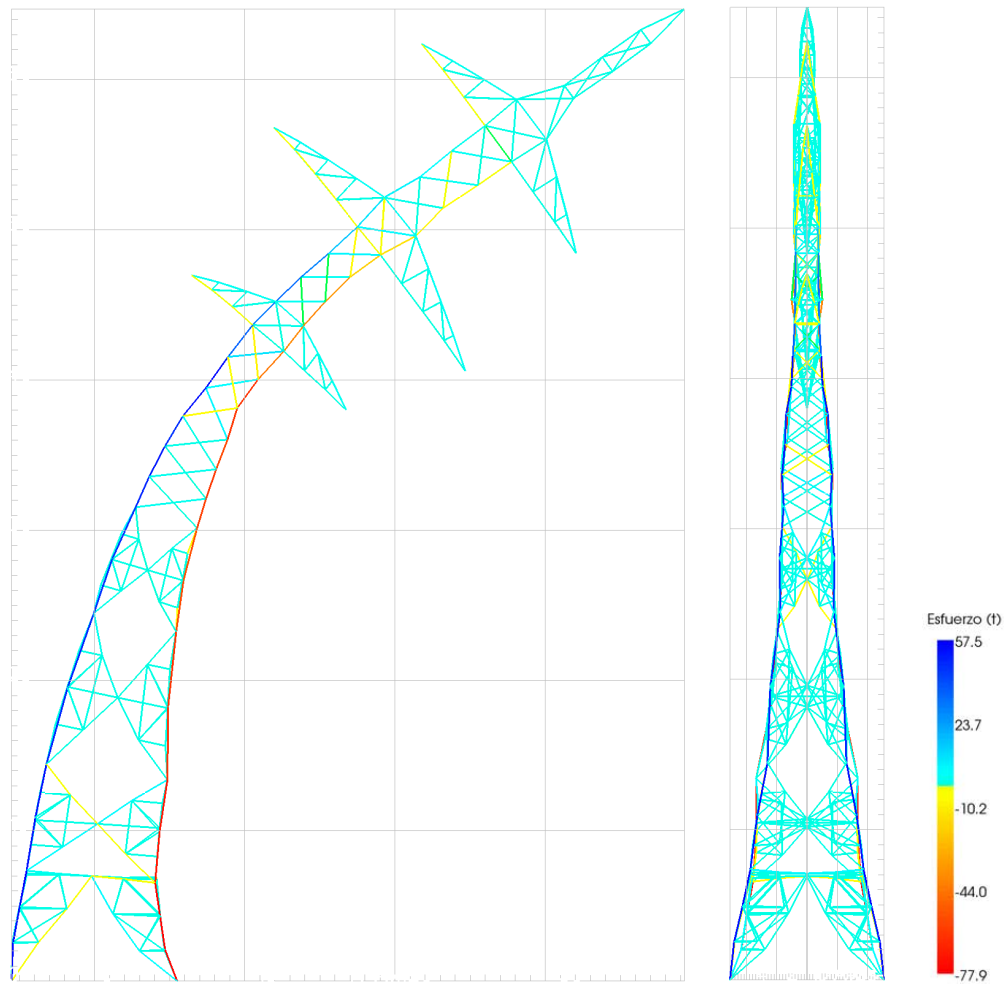


Figura 7.40: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección W.

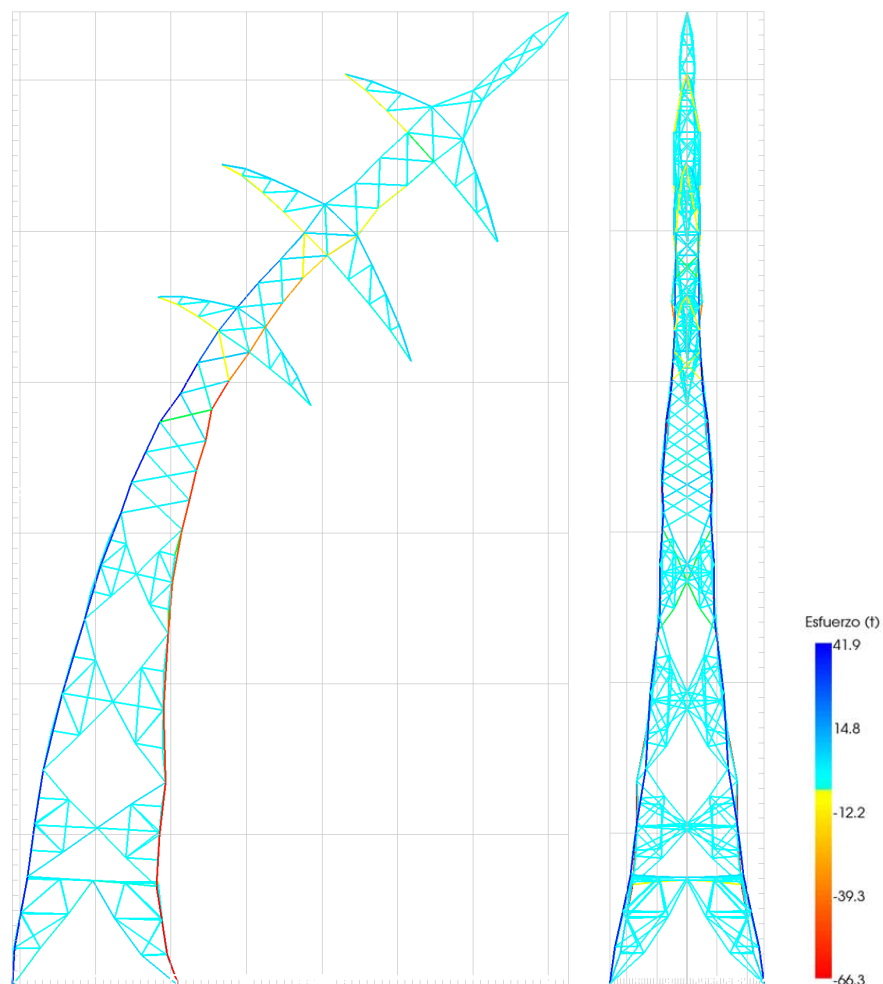


Figura 7.41: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 2.

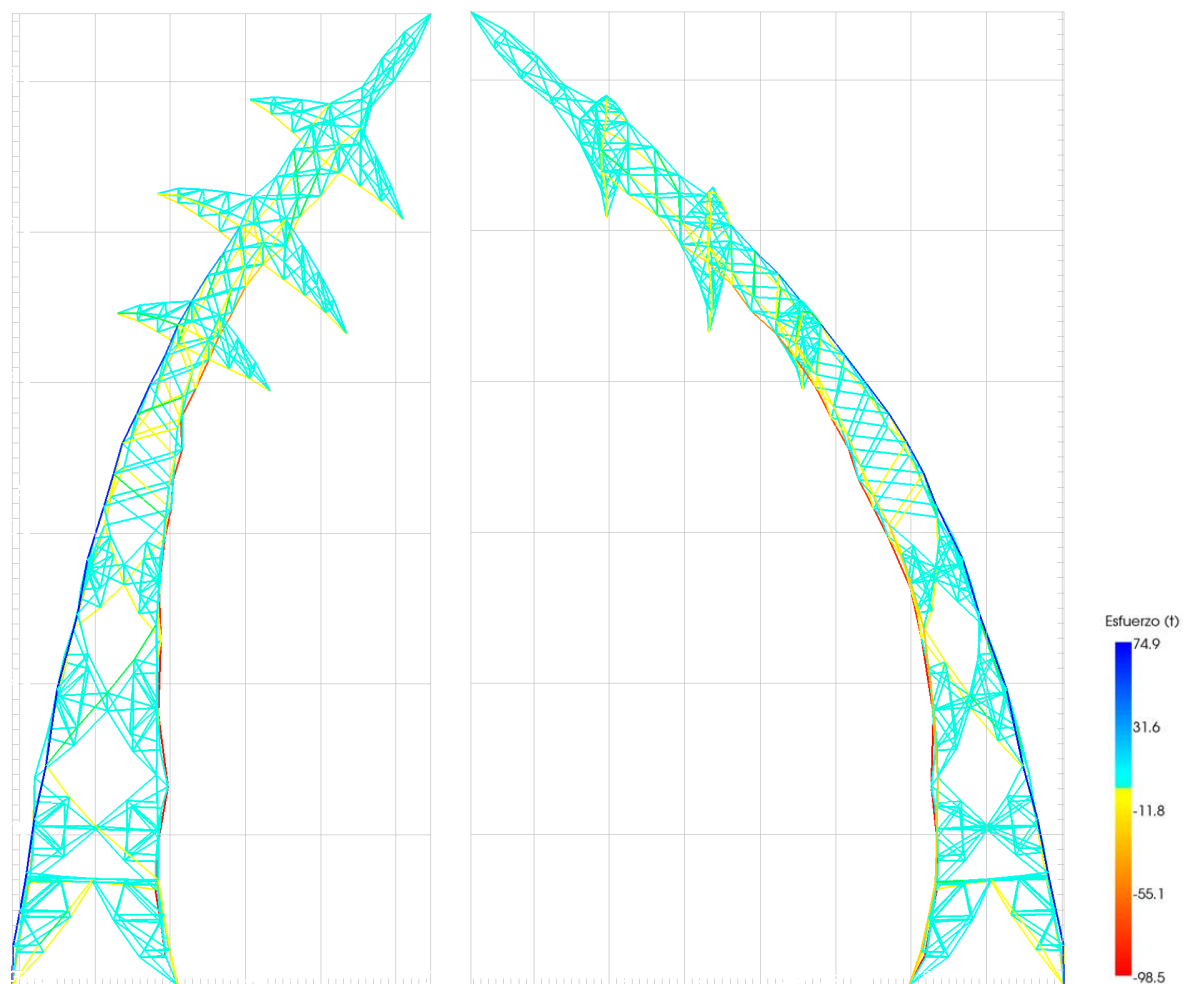


Figura 7.42: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 3.

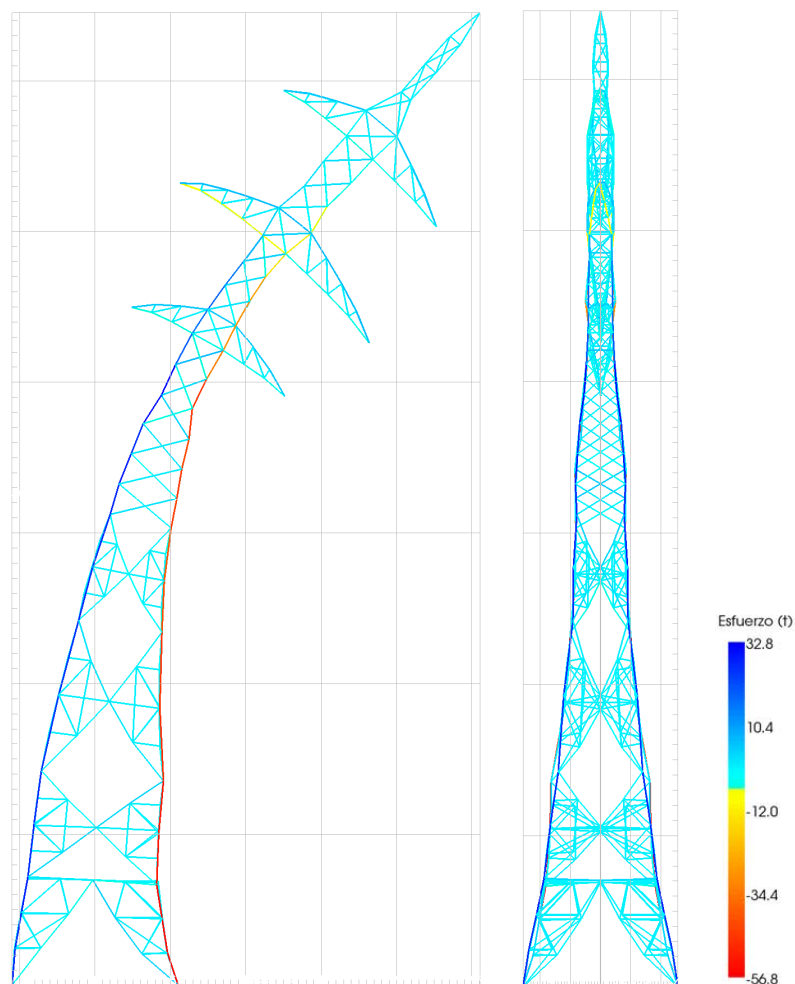


Figura 7.43: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito inferior.

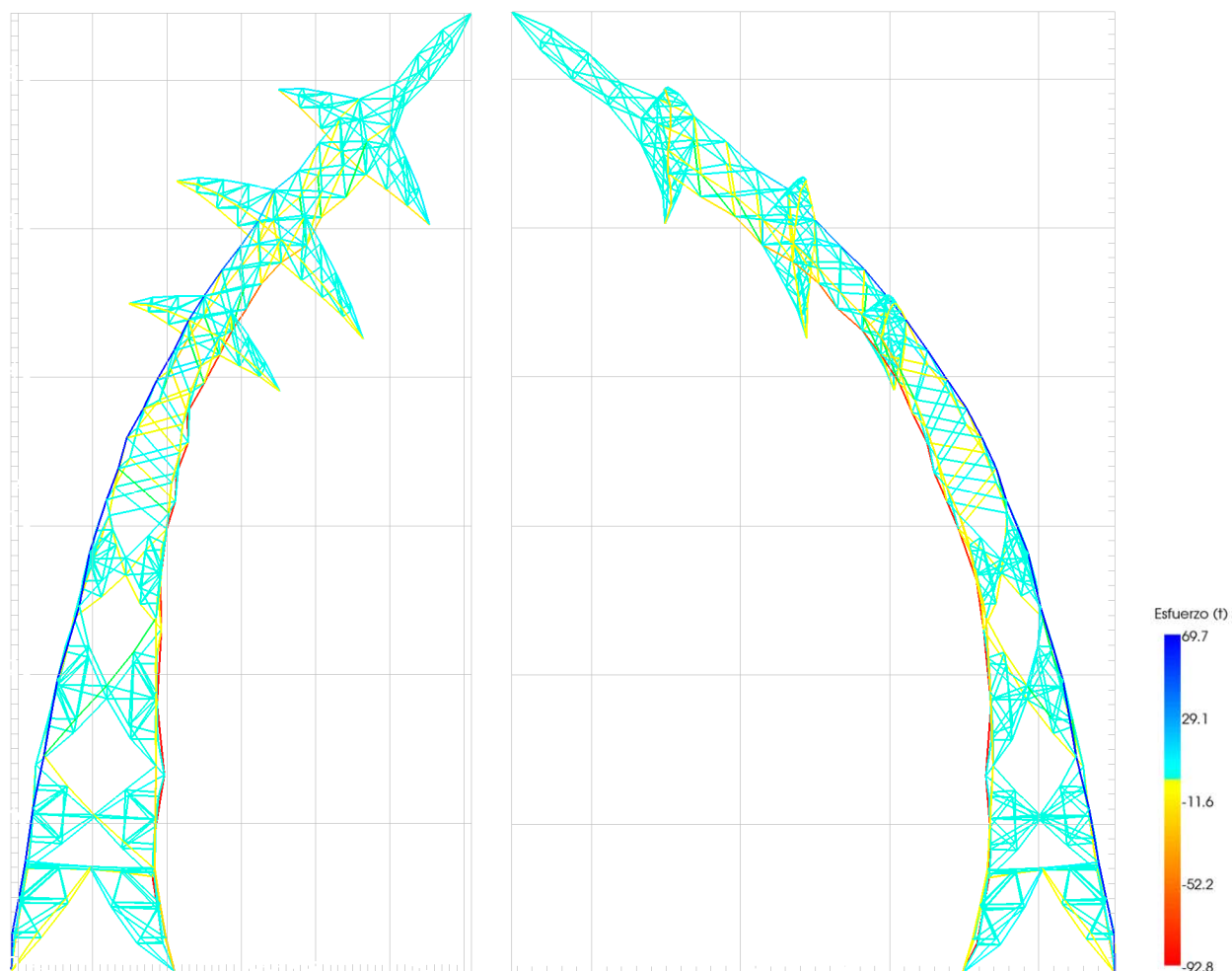


Figura 7.44: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito intermedio.

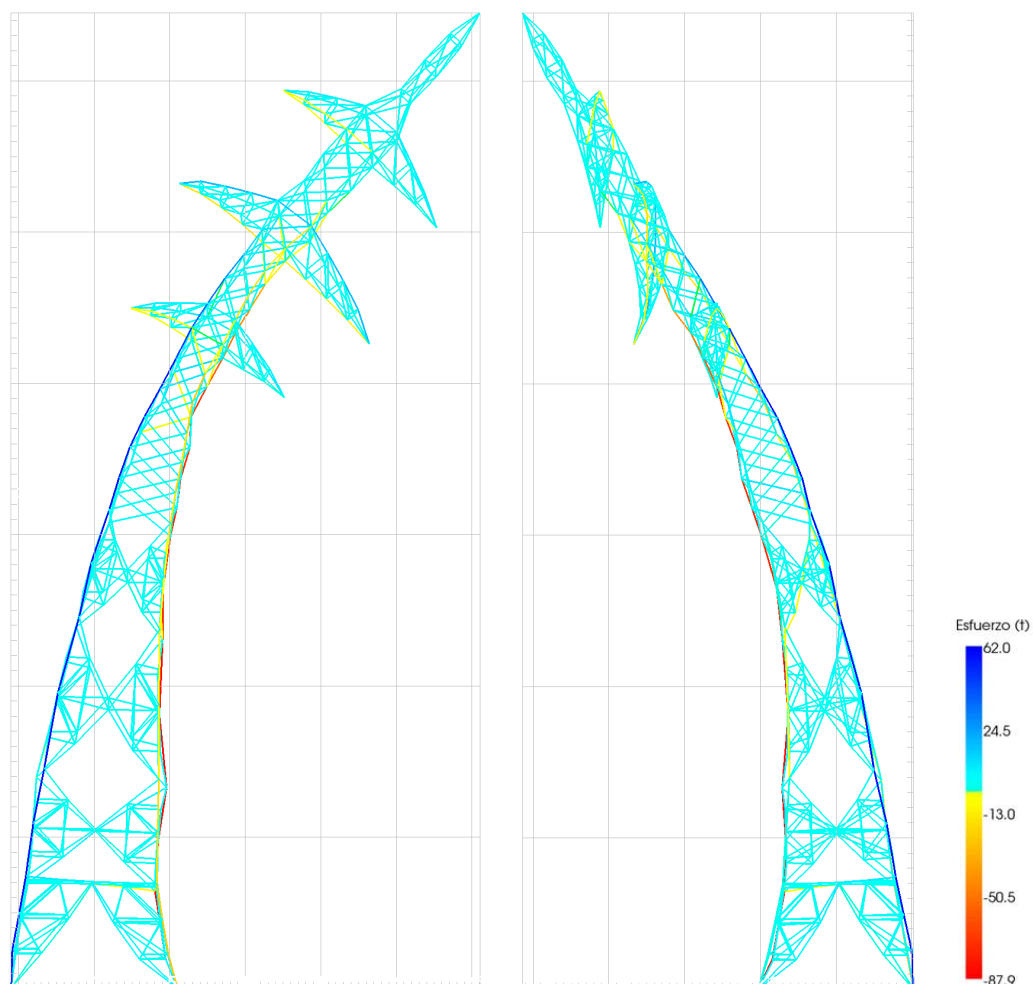


Figura 7.45: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito superior.

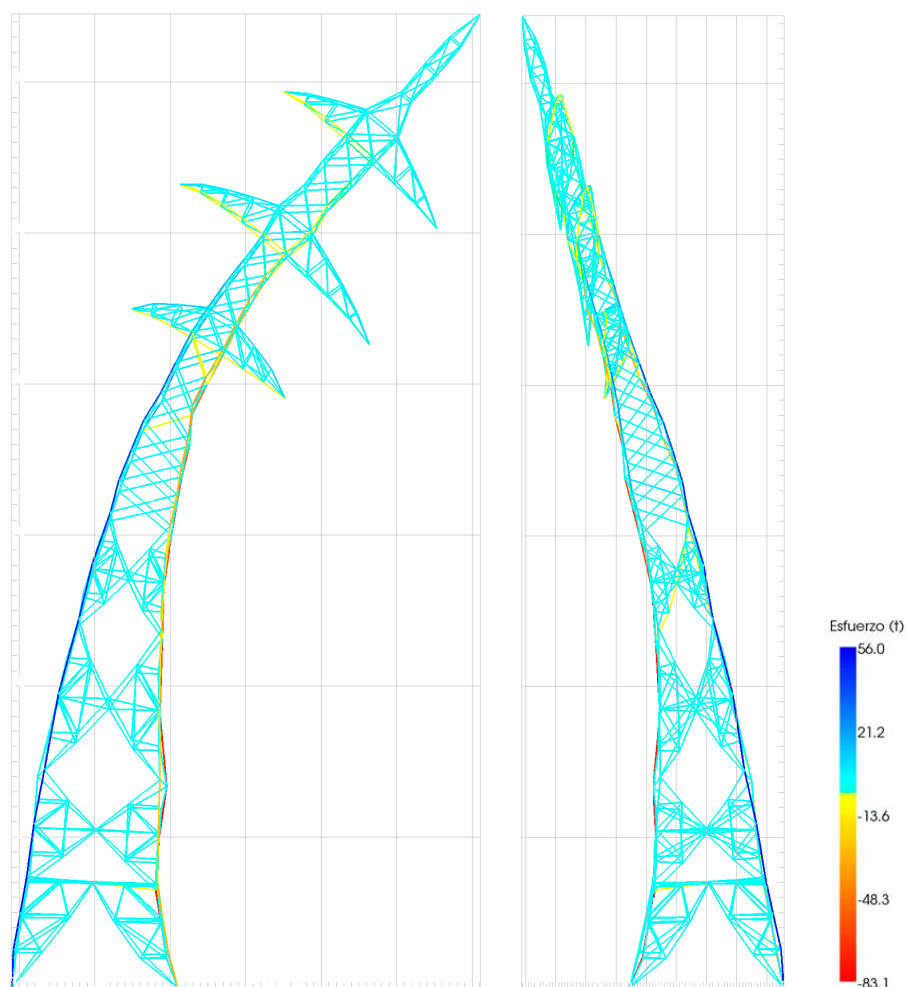


Figura 7.46: Torre de 220 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada a los cables de guarda.

Se puede observar que la baja sollicitación de la cúpula, es la responsable de que se vea estilizada sustancialmente. Al existir únicamente un punto de amarre de cableado, y además ser el cable de guarda el que solicita dicho punto de la estructura, el algoritmo tiende a retirar la mayor cantidad de material posible. Paralelamente, y para conseguir una mayor reducción de material, el algoritmo tiende a reducir la anchura de los módulos que la componen, hecho que reduce la longitud de las diagonales y barras horizontales, permitiendo categorías seccionales de menor entidad.

En referencia al tiempo de computación empleado por el algoritmo, y tal y como se recoge en la Tabla 7.10, el proceso de optimización se detiene tras 984 iteraciones, empleando un total de 8953.49 segundos. Si se compara el coste computacional del procedimiento cuando se implementa el análisis de sensibilidad, se observa que el ahorro en tiempo de cálculo es significativo. Tal y como se muestra en la Figura 7.47, el análisis de sensibilidad supone un ahorro en el tiempo de computación empleado de aproximadamente 2 órdenes de magnitud.

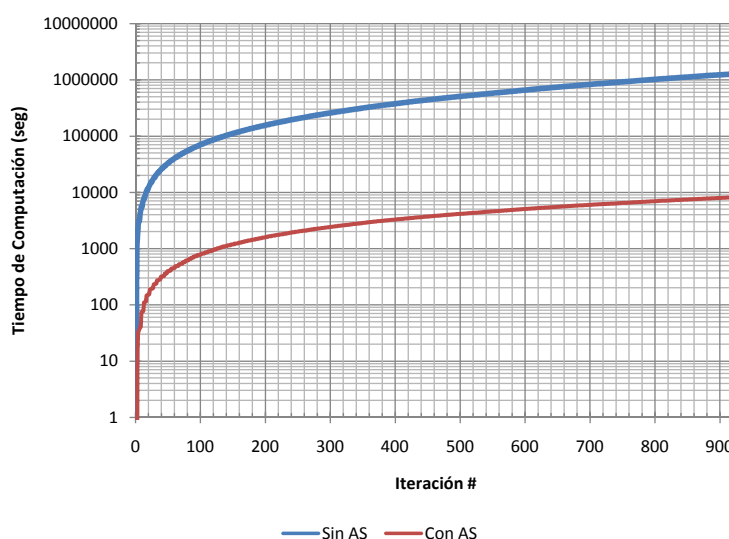


Figura 7.47: Torre de 220 kV: Comparación del tiempo de computación empleado considerando el Análisis de Sensibilidad (AS), o el cálculo directo.

Al igual que en el ejemplo anterior, la temperatura inicial se ha obtenido a partir de un proceso de calibración. De dicha calibración se puede comprobar que la expresión adoptada en el capítulo 6, se ajusta en gran medida al mínimo obtenido en las pruebas realizadas. En la Figura 7.48 se observa que el valor definido por la expresión propuesta en la presente tesis doctoral, se ajusta al valor que maximiza el ahorro de peso.

Por otro lado, en la Figura 7.49 se puede observar la evolución del algoritmo desde la

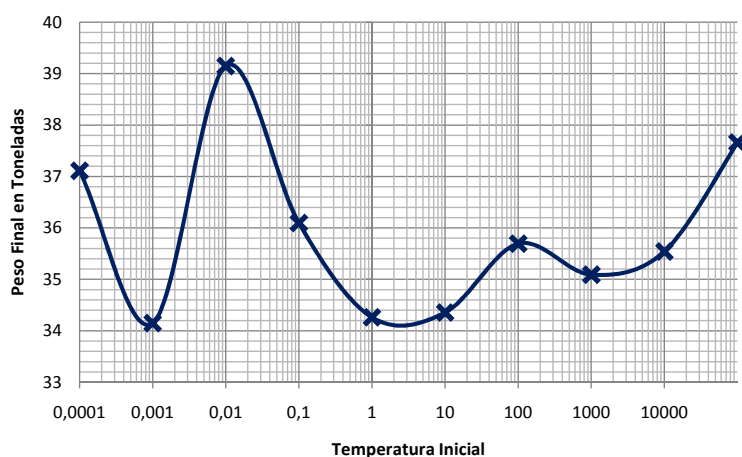


Figura 7.48: Torre de 220 kV: Resultado del algoritmo en función de la temperatura inicial.

situación inicial hasta su congelación. La geometría de la curva obtenida proporciona una leve rama casi horizontal que se extiende durante las primeras iteraciones. Posteriormente el algoritmo desarrolla una rama de descenso claramente marcada hasta que se detiene con una temperatura de $0.51e-07$. La congelación o parada del algoritmo, en este caso, sucede de forma súbita, de modo que apenas se aprecia un cambio final de tendencia.

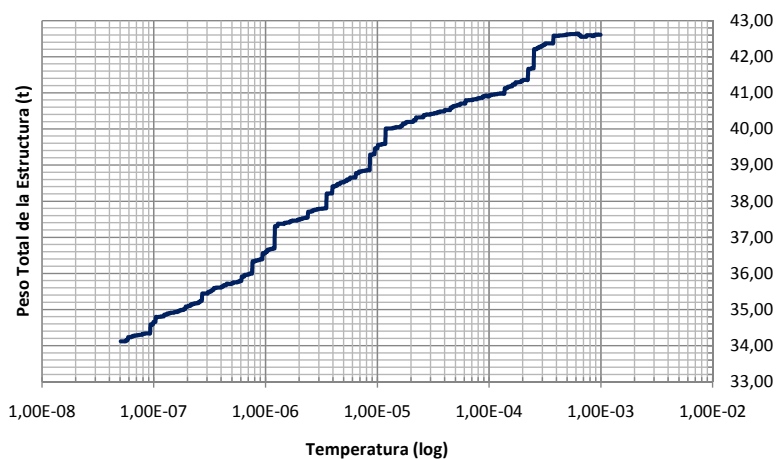


Figura 7.49: Torre de 220 kV: Evolución del algoritmo durante la ejecución.

Por último, el estado de las restricciones que condicionan el problema ha experimentado un incremento generalizado. La configuración estructural propuesta por el algoritmo proporciona un total de 139 restricciones activas, de las cuales, la mayoría responden a esfuerzos de compresión:

- 29 restricciones de esbeltez seccional.
- 46 restricciones de esbeltez elemental.
- 64 restricciones en esfuerzos.

Este hecho es representativo del funcionamiento de la estructura, quedando patente como este tipo de configuraciones es especialmente sensible a los esfuerzos de carácter compresivo. En las Figuras 7.50, 7.51 y 7.52 se adjuntan los gráficos de las restricciones diferenciando entre las categorías anteriormente expuestas.

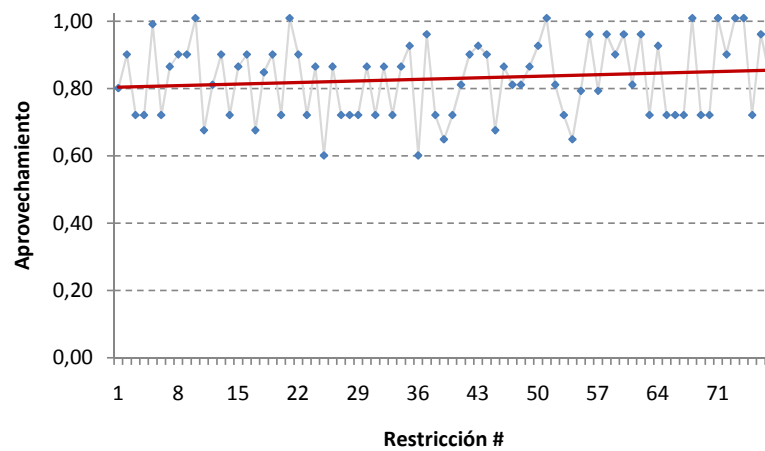


Figura 7.50: Torre de 220 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez seccional.

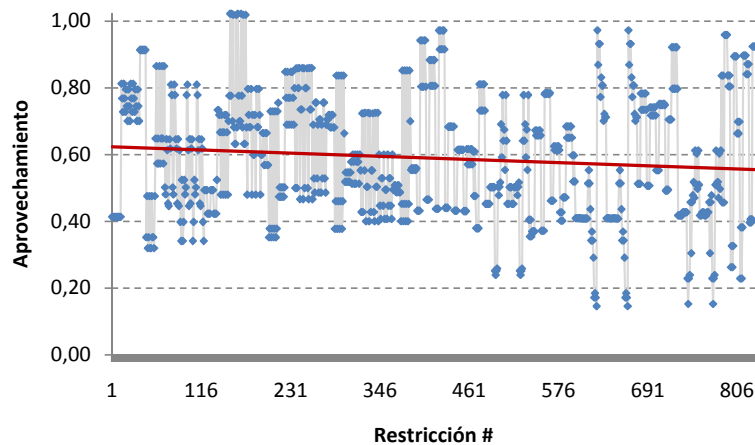


Figura 7.51: Torre de 220 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez elemental.

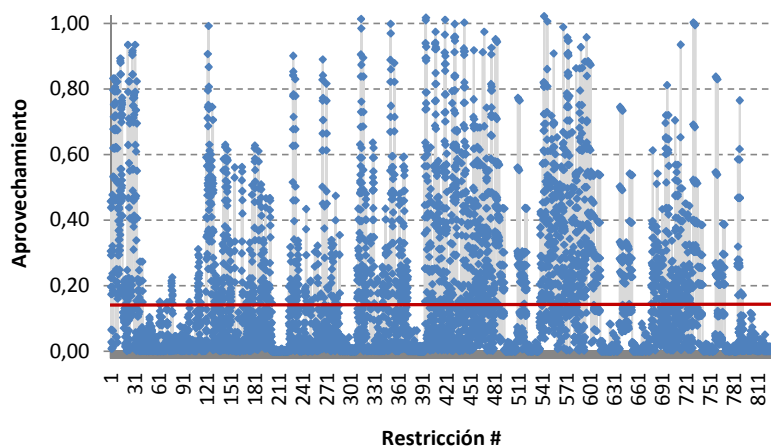


Figura 7.52: Torre de 220 kV: Valor final de las restricciones de esfuerzos.

En cualquier caso, si se analiza el número de restricciones que superan el 80 % de aprovechamiento, se observa como la esbeltez elemental, y por ende la geometría de la estructura, condiciona el resultado de modo similar al que lo condiciona su estado tensional, dado el número similar de restricciones de cada tipo que superan dicho valor.

7.4. Ejemplo de aplicación 3: Torre de 132 kV

Finalmente la última de las configuraciones estudiadas corresponde con una de las más populares estructuras de transporte. Se trata de una torre de simple circuito a tresbolillo para circuitos de 132 kV como las que se recogen en la Figura 7.53. Este tipo de estructuras puede llegar a alcanzar hasta 34 m de altura y un peso total próximo a las 10 toneladas.

En los siguientes epígrafes se detallan las características del modelo estudiado, describiendo tanto su geometría como las cargas que lo solicitan.

7.4.1. Geometría considerada

En el caso que nos ocupa se estudia una torre de 26,40 m de altura total formada a partir de la superposición de 18 módulos, que conforman una estructura de 127 nodos conectados a través de 406 elementos. En la Tabla 7.13 se puede consultar la secuencia modular que compone la estructura, con las características y dimensiones de cada uno de los bloques que la componen.



Figura 7.53: Torre de 132 kV: Estructuras de alta tensión similares a la estudiada en el ejemplo de aplicación 3.

Módulo	Altura (m)	Cota (m)	Base Inf. X (m)	Base Inf. Y (m)	Base Sup. X (m)	Base Sup. Y (m)	Long. ala (m)	Altura alas (m)
1 K	3.600	3.600	3.69	3.69	3.19	3.19	—	—
2 X	2.000	5.600	3.19	3.19	2.92	2.92	—	—
3 X	1.800	7.400	2.92	2.92	2.67	2.67	—	—
4 X	1.800	9.200	2.67	2.67	2.42	2.42	—	—
5 X	1.600	10.800	2.42	2.42	2.20	2.20	—	—
6 X	1.600	12.400	2.20	2.20	1.97	1.97	—	—
7 X	1.500	13.900	1.97	1.97	1.77	1.77	—	—
8 X	1.500	15.400	1.77	1.77	1.56	1.56	—	—
9 X	1.500	16.900	1.56	1.56	1.36	1.36	—	—
10 Súper X	1.100	18.000	1.36	1.36	1.20	1.20	—	—
11 Cruceta Lateral	1.100	19.100	1.20	1.20	1.20	1.20	3.20	—
12 Súper X	1.100	20.200	1.20	1.20	1.20	1.20	—	—
13 Cruceta Lateral	1.100	21.300	1.20	1.20	1.20	1.20	3.10	—
14 Súper X	1.100	22.400	1.20	1.20	1.20	1.20	—	—
15 Cruceta Lateral	1.100	23.500	1.20	1.20	1.20	1.20	3.10	—
16 Súper Lambda	1.100	24.600	1.20	1.20	0.74	0.74	—	—
17 Súper Lambda	1.100	25.700	0.74	0.74	0.29	0.29	—	—
18 Cúpula	0.700	26.400	0.29	0.29	0.00	0.00	—	—

Tabla 7.13: Torre de 132 kV: Listado de módulos que componen la estructura.

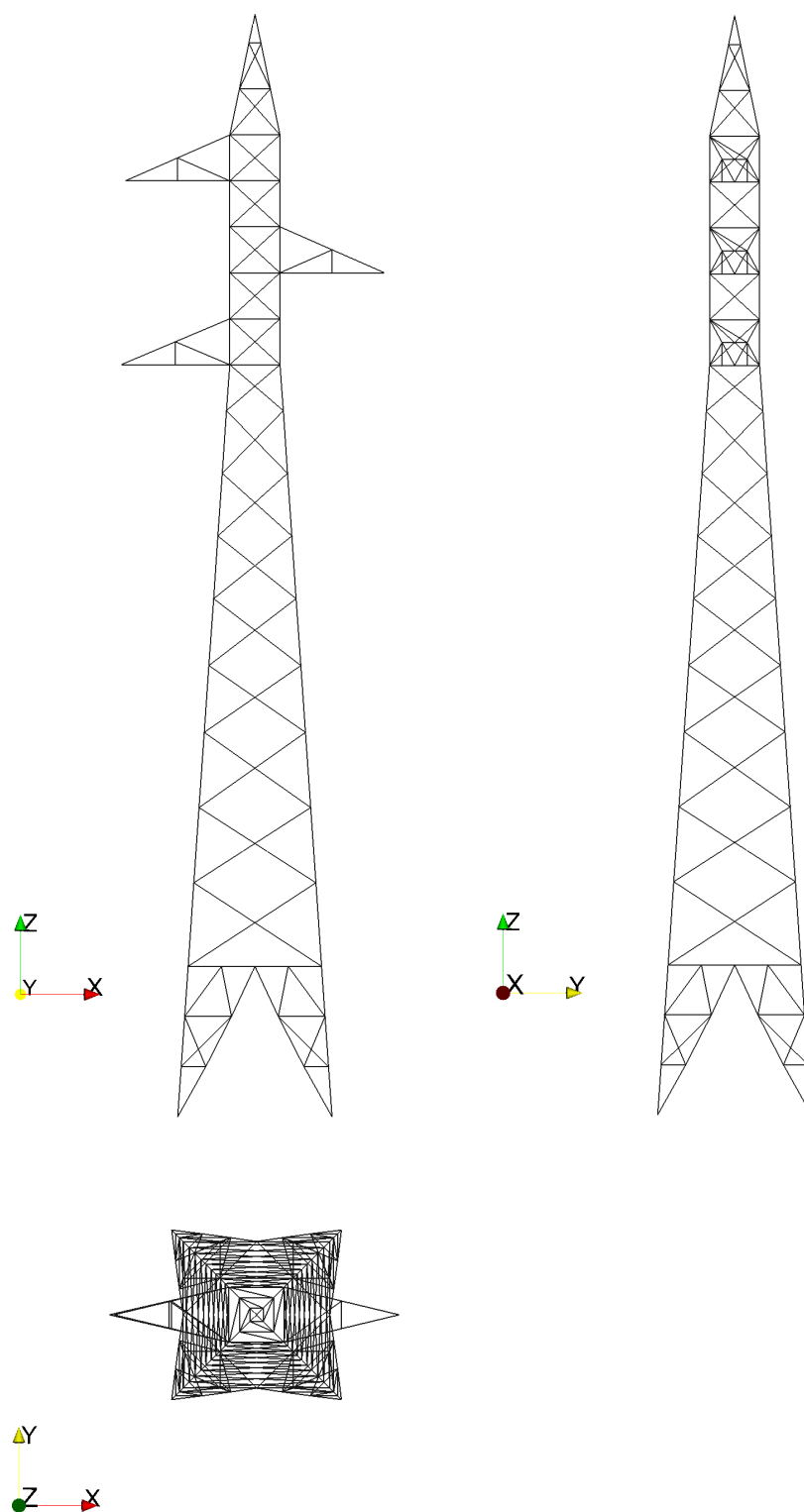


Figura 7.54: Torre de 132 kV: Geometría de la torre analizada.

De este modo se obtiene una estructura con un total de 57 materiales y un peso total de 6.61 toneladas, de acuerdo con las características descritas en la Tabla 7.14 y la Figura 7.55.

Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
1	L180.18	61.56	750.03	30	L60.5	5.75	7.92
2	L100.8	15.36	58.98	31	L40.3	2.31	1.43
3	L100.8	15.36	58.98	32	L40.3	2.31	1.43
4	L70.8	10.56	19.17	33	L60.5	5.75	7.92
5	L70.8	10.56	19.17	34	L60.5	5.75	7.92
6	L100.8	15.36	58.98	35	L60.5	5.75	7.92
7	L100.8	15.36	58.98	36	L60.5	5.75	7.92
8	L180.18	61.56	750.03	37	L60.5	5.75	7.92
9	L100.8	15.36	58.98	38	L60.5	5.75	7.92
10	L180.18	61.56	750.03	39	L60.5	5.75	7.92
11	L90.8	13.76	42.40	40	L40.3	2.31	1.43
12	L180.18	61.56	750.03	41	L40.3	2.31	1.43
13	L90.8	13.76	42.40	42	L60.5	5.75	7.92
14	L180.18	61.56	750.03	43	L60.5	5.75	7.92
15	L90.8	13.76	42.40	44	L60.5	5.75	7.92
16	L150.14	40.04	341.16	45	L50.4	3.84	3.69
17	L75.8	11.36	23.86	46	L50.4	3.84	3.69
18	L150.14	40.04	341.16	47	L50.4	3.84	3.69
19	L75.8	11.36	23.86	48	L50.4	3.84	3.69
20	L100.8	15.36	58.98	49	L40.3	2.31	1.43
21	L60.5	5.75	7.92	50	L40.3	2.31	1.43
22	L100.8	15.36	58.98	51	L50.4	3.84	3.69
23	L60.5	5.75	7.92	52	L40.3	2.31	1.43
24	L100.8	15.36	58.98	53	L40.3	2.31	1.43
25	L60.5	5.75	7.92	54	L50.4	3.84	3.69
26	L60.5	5.75	7.92	55	L40.3	2.31	1.43
27	L60.5	5.75	7.92	56	L40.3	2.31	1.43
28	L60.5	5.75	7.92	57	L50.4	3.84	3.69
29	L60.5	5.75	7.92				

Tabla 7.14: Torre de 132 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría inicial.

En los archivos adjuntos, se pueden consultar los listados con las coordenadas nodales, conectividad y distribución de materiales del ejemplo N° 3.

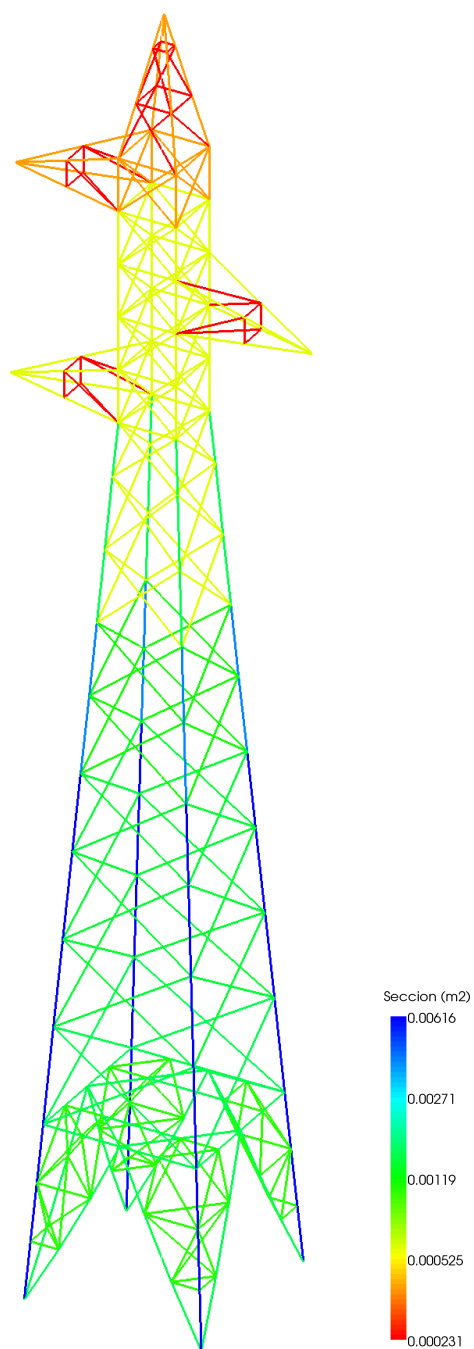


Figura 7.55: Torre de 132 kV: Distribución final de material dentro la estructura.

7.4.2. Cargas actuantes

Como cargas solicitantes de la estructura se han adoptado aquellos valores que los fabricantes de apoyos recomiendan para este tipo de estructuras, considerando un apoyo capaz de soportar un ángulo de hasta 15° y cadenas de amarre. En la tabla 7.15 se adjuntan los valores del árbol de cargas de la estructura, de acuerdo con el esquema recogido en la Figura 7.56.

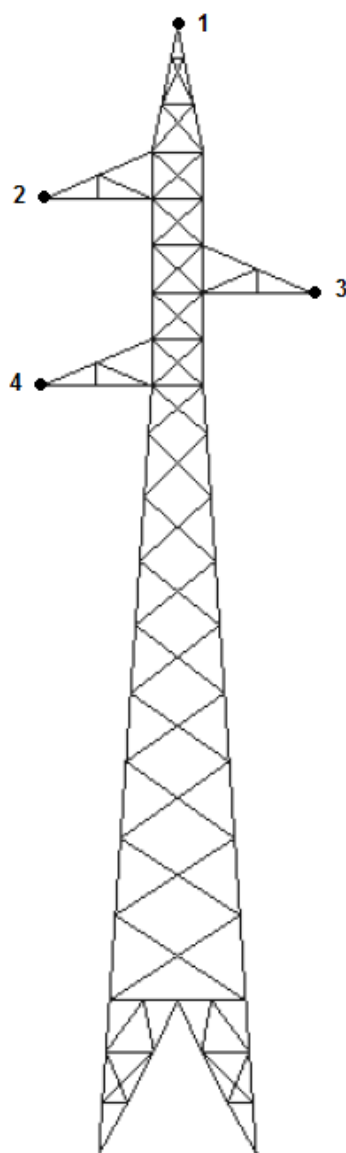


Figura 7.56: Torre de 132 kV: Sistema de cableado elegido.

Cable	Hipótesis	Carga		
		Longitudinal (T)	Vertical (T)	Transversal (T)
1	1 ^a	0.000	−0.300	0.460
	2 ^a	0.000	−0.640	0.230
	3 ^a	0.620	−0.640	0.230
	4.1 ^a	0.000	−0.640	0.230
	4.2 ^a	0.000	−0.640	0.230
	4.3 ^a	0.000	−0.640	0.230
	4.4 ^a	1.400	−0.320	0.115
2	1 ^a	0.000	−0.550	0.650
	2 ^a	0.000	−0.960	0.325
	3 ^a	0.970	−0.960	0.325
	4.1 ^a	0.000	−0.960	0.325
	4.2 ^a	0.000	−0.960	0.325
	4.3 ^a	1.550	−0.480	0.162
	4.4 ^a	0.000	−0.960	0.325
3	1 ^a	0.000	−0.550	0.650
	2 ^a	0.000	−0.960	0.325
	3 ^a	0.970	−0.960	0.325
	4.1 ^a	0.000	−0.960	0.325
	4.2 ^a	1.550	−0.480	0.162
	4.3 ^a	0.000	−0.960	0.325
	4.4 ^a	0.000	−0.960	0.325
4	1 ^a	0.000	−0.550	0.650
	2 ^a	0.000	−0.960	0.325
	3 ^a	0.970	−0.960	0.325
	4.1 ^a	1.550	−0.480	0.162
	4.2 ^a	0.000	−0.960	0.325
	4.3 ^a	0.000	−0.960	0.325
	4.4 ^a	0.000	−0.960	0.325

Tabla 7.15: Torre de 132 kV: Carga en toneladas sobre cada uno de los puntos de amarre de los conductores para las diferentes hipótesis de carga consideradas.

7.4.3. Estado inicial de las restricciones

Una vez expuestas las principales características del diseño inicial considerado, se procede a tratar el estado condicional del problema. En este sentido, en las Figuras 7.57, 7.58

y 7.59, se adjunta a modo de gráfico el valor de las restricciones de esbeltez seccional, elemental y de esfuerzos, respectivamente.

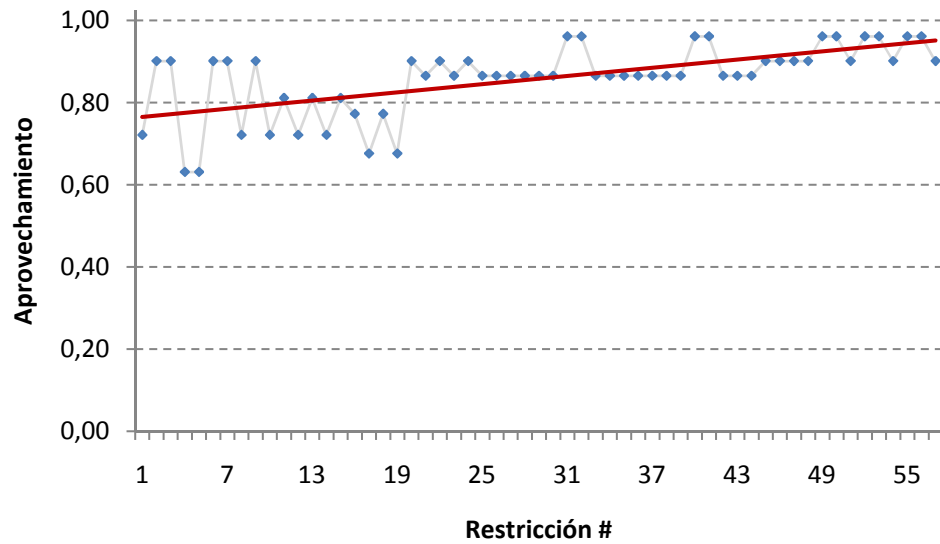


Figura 7.57: Torre de 132 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez seccional.

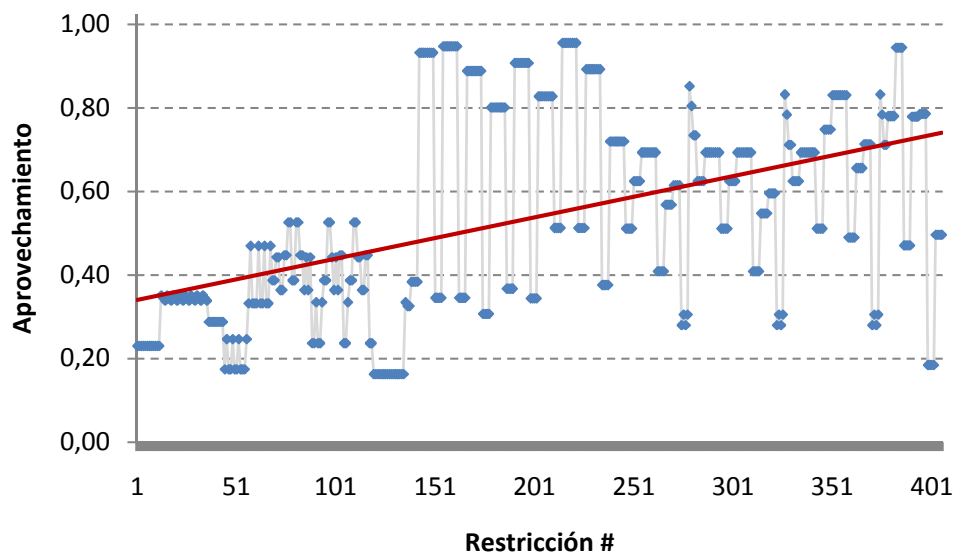


Figura 7.58: Torre de 132 kV: Valor inicial de las restricciones de esbeltez elemental.

Con todo, el diseño estructural inicial activa un total de 61 restricciones repartidas entre esbeltez seccional y elemental del siguiente modo:

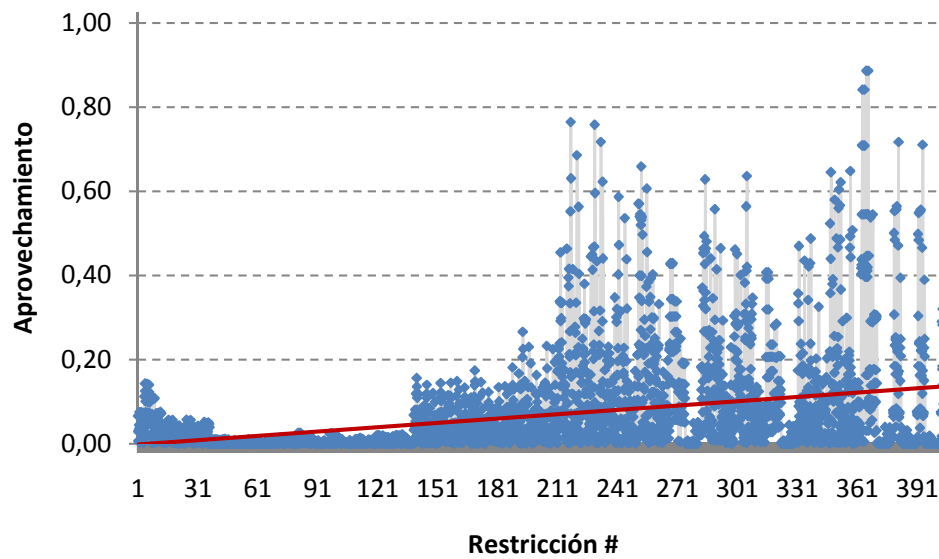


Figura 7.59: Torre de 132 kV: Valor inicial de las restricciones de esfuerzos.

- 25 restricciones de esbeltez seccional.
- 36 restricciones de esbeltez elemental.
- 0 restricciones en esfuerzos.

De acuerdo con estos datos, el diseño original se muestra especialmente condicionado por la geometría de la estructura. Este hecho se ratifica al analizar el reparto de restricciones que superan el 80 % de su aprovechamiento:

- 46 restricciones de esbeltez seccional.
- 80 restricciones de esbeltez elemental.
- 4 restricciones en esfuerzos.

En este sentido, el bajo número de restricciones en esfuerzo que condicionan, o están próximas a condicionar, el problema revela cómo el diseño original es propio de una geometría poco ajustada a las solicitaciones que actúan sobre la estructura.

7.4.4. Resultados de la Optimización

En el presente ejemplo de aplicación, el algoritmo propuesto en la presente tesis proporciona una configuración final de torre que supone un ahorro total del 41.67 %. El resultado

se obtiene después de 1398 iteraciones empleando un total de 5183.57 segundos. Al igual que en los casos anteriores, las principales características del proceso de optimización se recogen en la Tabla 7.16.

RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DE LA EVOLUCIÓN DE LA TORRE DE 132kV	
Nº de Materiales	57
Nº de Elementos	406
Nº Total de Variables	150
Nº de Restricciones	4523
Peso Inicial (t)	6.606
Peso Final (t)	3.341
Porcentaje de Reducción	49.387
Nº de Iteraciones Totales	1388
Iteración del Máximo	1398
Tiempo de Computación Empleado (s)	5183.57
Temperatura Inicial	0.10e-01
Temperatura Final	0.79e-08

Tabla 7.16: Torre de 132 kV: Resumen de las principales características del algoritmo.

En este caso, la metodología propuesta modifica tanto la geometría como las secciones, siendo especialmente relevante la modificación geométrica que propone. En cualquier caso, cabe reseñar cómo el algoritmo es capaz de reducir el peso total de la estructura a la mitad del peso inicial. Este hecho es significativo de un claro sobredimensionamiento de la estructura. En este sentido, también debe asumirse que el algoritmo propuesto debe partir de soluciones relativamente próximas a la solución final, por lo que valores de reducción tan elevados como los obtenidos, proporcionan soluciones igualmente válidas, pero que no pueden asumirse como óptimos globales. A continuación puede consultarse tanto la geometría obtenida como la distribución de material del resultado en las Tablas 7.17 y 7.18, así como en las Figuras 7.60 y 7.61.

Módulo	Altura (m)	Base Inf. X (m)	Base Inf. Y (m)	Base Sup. X (m)	Base Sup. Y (m)	Long. ala (m)	Altura alas (m)
1 K	3.60	3.45	2.96	2.13	2.00	—	—
2 X	2.00	2.13	2.01	1.79	1.81	—	—
3 X	1.80	1.79	1.81	1.81	1.52	—	—
4 X	1.80	1.81	1.52	1.65	1.66	—	—
5 X	1.60	1.65	1.66	1.57	1.48	—	—
6 X	1.60	1.57	1.48	1.28	1.18	—	—
7 X	1.50	1.28	1.18	1.01	1.03	—	—
8 X	1.50	1.01	1.03	1.09	0.91	—	—
9 X	1.50	1.09	0.91	0.92	0.89	—	—
10 Súper X	1.10	0.92	0.89	1.01	0.60	—	—
11 Cruceta Lateral	1.10	1.01	0.61	0.67	1.02	3.20	—
12 Súper X	1.10	0.67	1.02	0.85	0.94	—	—
13 Cruceta Lateral	1.10	0.85	0.94	0.81	0.55	3.10	—
14 Súper X	1.10	0.81	0.55	0.59	0.73	—	—
15 Cruceta Lateral	1.10	0.59	0.73	0.58	1.09	3.10	—
16 Súper Lambda	1.10	0.58	1.09	0.57	0.53	—	—
17 Súper Lambda	1.10	0.57	0.53	0.72	0.61	—	—
18 Cúpula	0.70	0.72	0.61	0.00	0.00	—	—

Tabla 7.17: Torre de 132 kV: Valores de los variables geométricas para la solución obtenida.

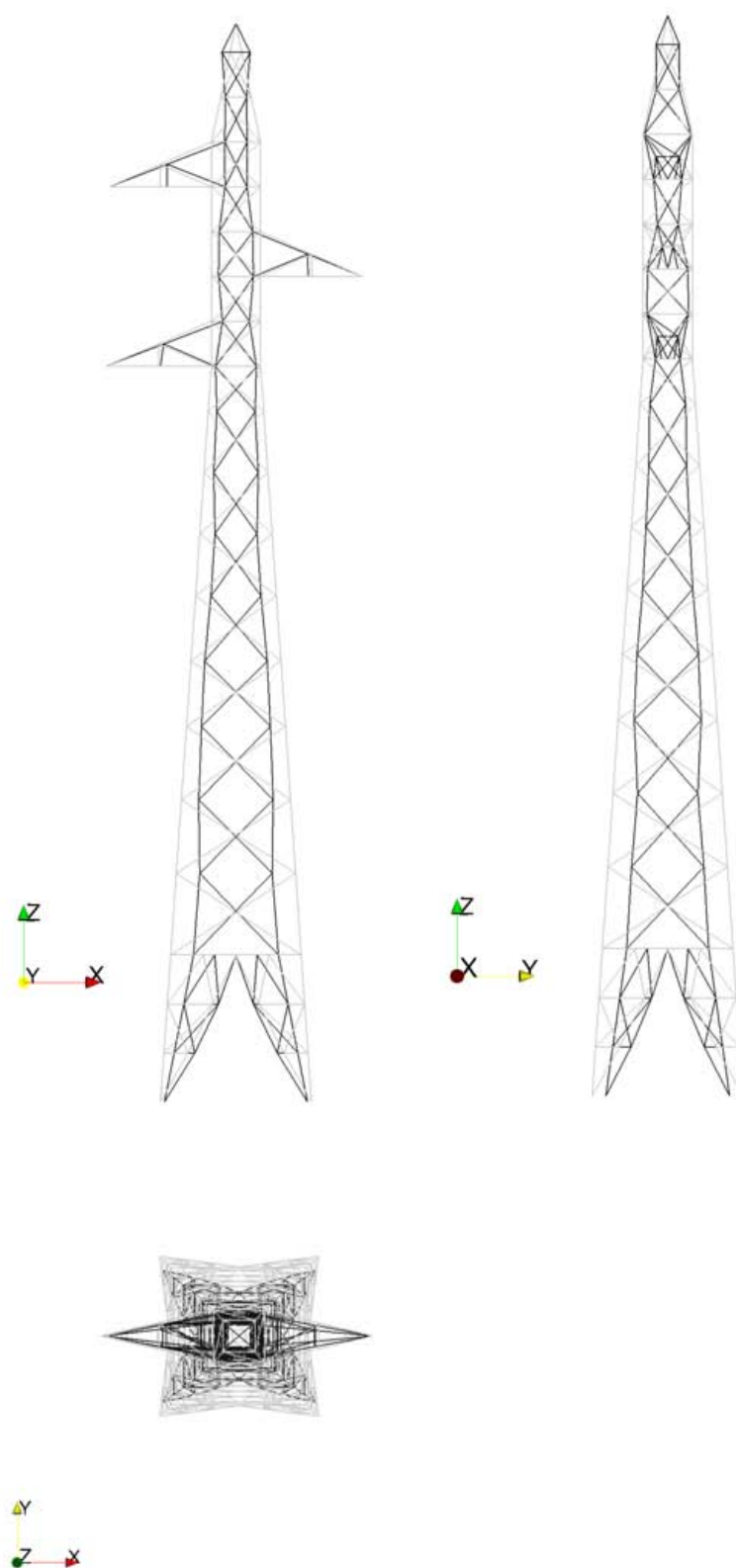


Figura 7.60: Torre de 132 kV: Geometría de la solución obtenida para la torre analizada.

Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)	Material	Perfil	Área (cm ²)	Inercia (cm ⁴)
1	L120.13	29.51	158.39	30	L60.5	5.75	7.92
2	L70.5	6.75	12.81	31	L25.3	1.41	0.32
3	L50.5	4.75	4.46	32	L40.3	2.31	1.42
4	L50.5	4.75	4.46	33	L70.7	9.31	17.15
5	L40.4	3.04	1.82	34	L60.6	6.84	9.25
6	L75.6	8.64	18.66	35	L50.4	3.84	3.68
7	L30.3	1.71	0.57	36	L50.5	4.75	4.46
8	L100.10	19.00	71.44	37	L60.5	5.75	7.92
9	L90.7	12.11	37.75	38	L45.5	4.25	3.19
10	L120.10	23.00	126.73	39	L60.5	5.75	7.92
11	L70.5	6.75	12.81	40	L25.3	1.41	0.32
12	L120.13	29.51	158.39	41	L40.3	2.31	1.42
13	L75.7	10.01	21.32	42	L60.6	6.84	9.25
14	L120.15	33.75	177.97	43	L60.5	5.75	7.92
15	L70.5	6.75	12.81	44	L40.3	2.31	1.42
16	L90.8	13.76	42.40	45	L45.4	3.44	2.65
17	L60.5	5.75	7.92	46	L50.5	4.75	4.46
18	L100.10	19.00	71.44	47	L45.5	4.25	3.19
19	L70.5	6.75	12.81	48	L60.5	5.75	7.92
20	L80.8	12.16	29.26	49	L35.4	2.64	1.19
21	L70.5	6.75	12.81	50	L45.5	4.25	3.19
22	L80.8	12.16	29.26	51	L75.6	8.64	18.66
23	L70.5	6.75	12.81	52	L40.4	3.04	1.82
24	L70.7	9.31	17.15	53	L35.4	2.64	1.19
25	L60.5	5.75	7.92	54	L45.5	4.25	3.19
26	L50.5	4.75	4.46	55	L45.4	3.44	2.65
27	L70.5	6.75	12.81	56	L25.3	1.41	0.32
28	L60.6	6.84	9.25	57	L35.3	2.01	0.93
29	L45.5	4.25	3.19				

Tabla 7.18: Torre de 132 kV: Codificación de los perfiles dispuestos en la geometría final.

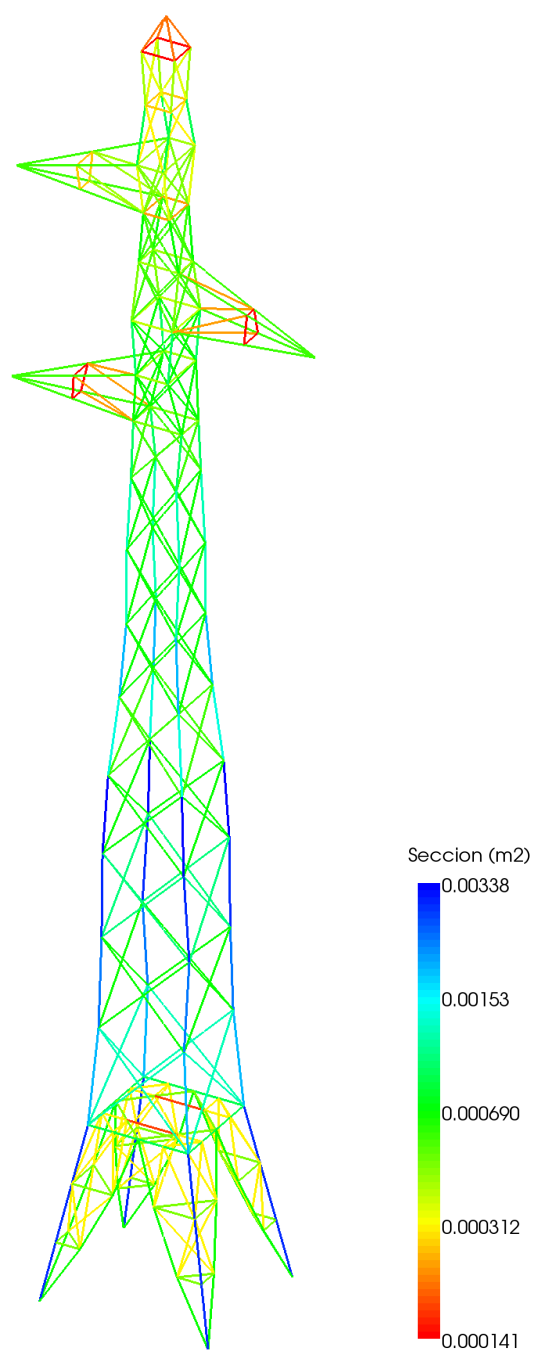


Figura 7.61: Torre de 132 kV: Distribución final de material dentro la estructura.

De acuerdo con la Figura 7.60, el algoritmo proporciona una geometría mucho más esbelta que la original. Se observa cómo el resultado corresponde a una configuración característica de estructuras en las que las solicitaciones derivadas del peso propio, preponderan frente a los esfuerzos derivados del cableado. Este hecho se pone de manifiesto al analizar tanto las cargas actuantes sobre la estructura, de menor entidad que en el resto de ejemplos estudiados, como en los esfuerzos obtenidos del análisis estructural. Como se puede observar en la Figura 7.62 los esfuerzos apenas superan las 18 toneladas de tracción y las 21 toneladas a compresión.

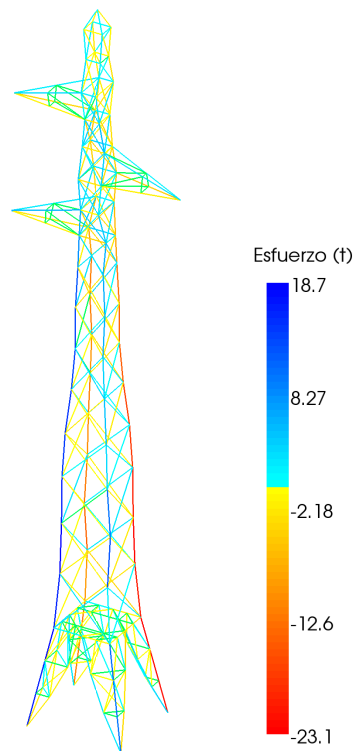


Figura 7.62: Torre de 132 kV: Envolvente de los esfuerzos obtenidos.

Estas magnitudes son claramente inferiores a las obtenidas en el resto de estructuras analizadas, en las que tanto los esfuerzos de compresión como de tracción alcanzaban las 90 toneladas. Los resultados obtenidos del cálculo estructural de cada una de las hipótesis de carga estudiadas se adjuntan desde la Figura 7.63 a la 7.72.

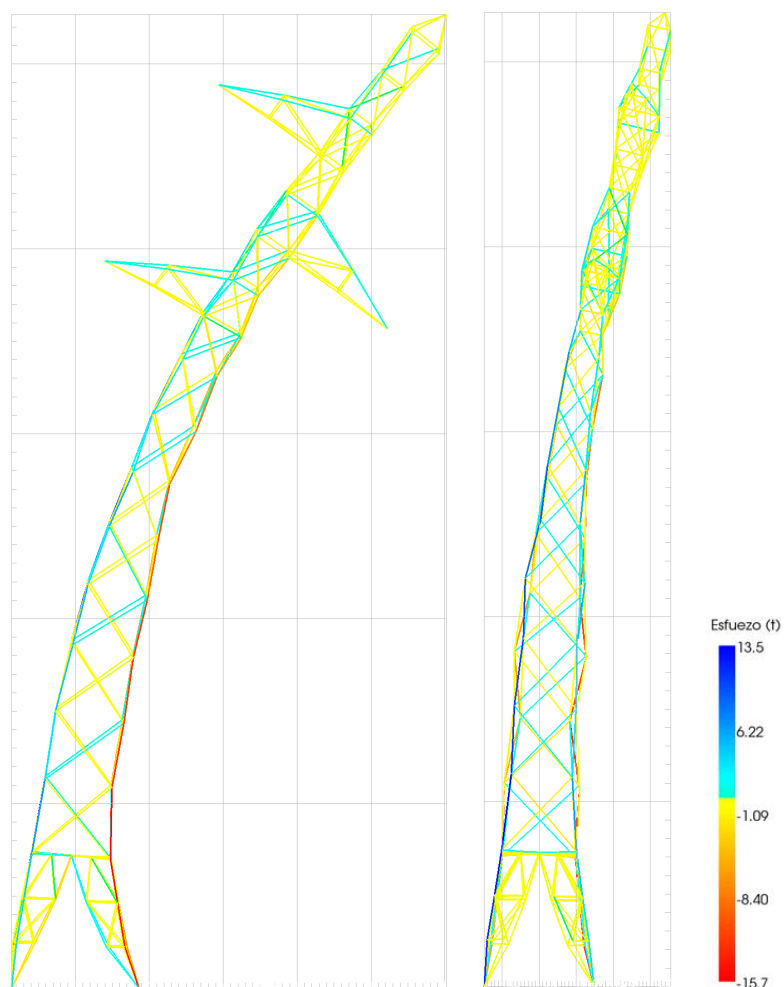


Figura 7.63: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección N.

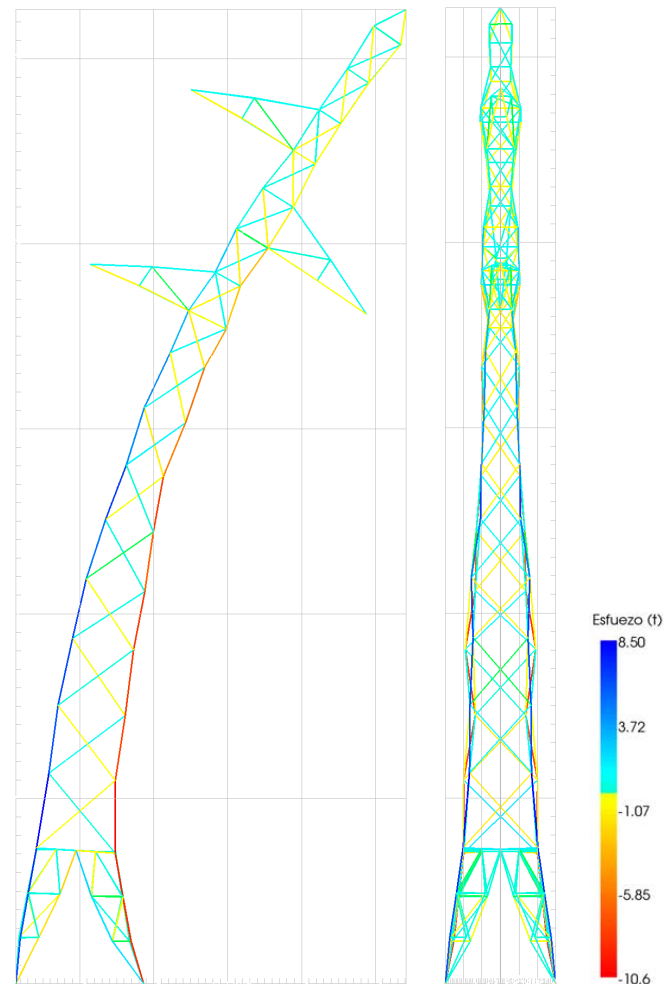


Figura 7.64: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección E.

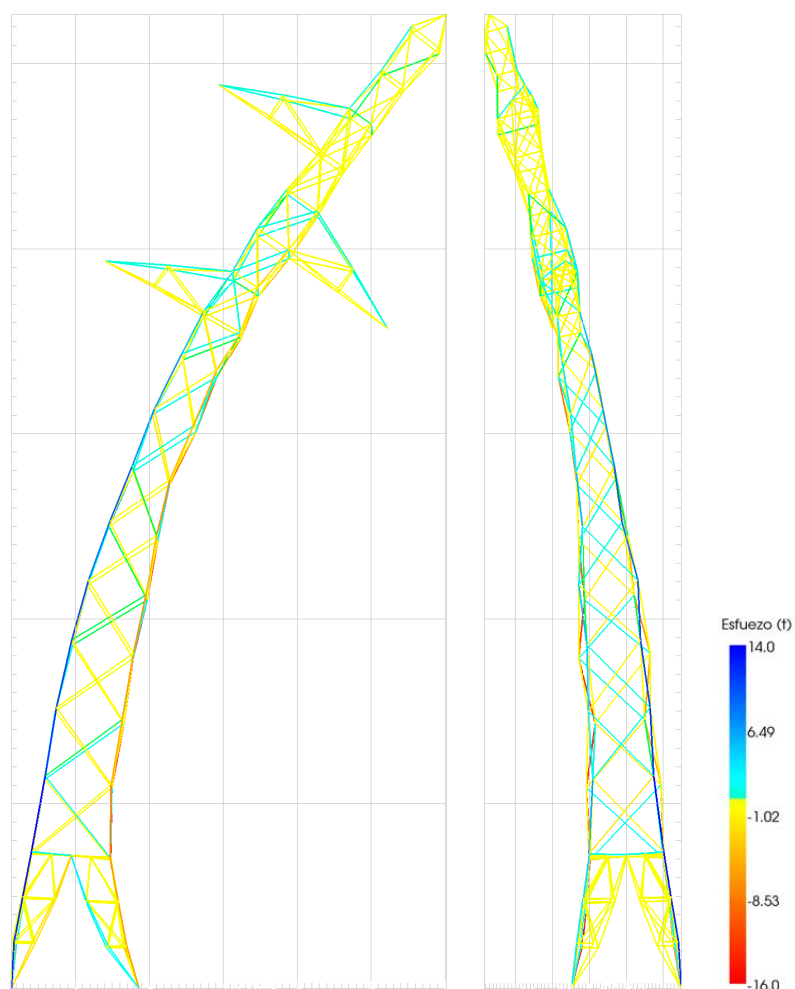


Figura 7.65: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección S.

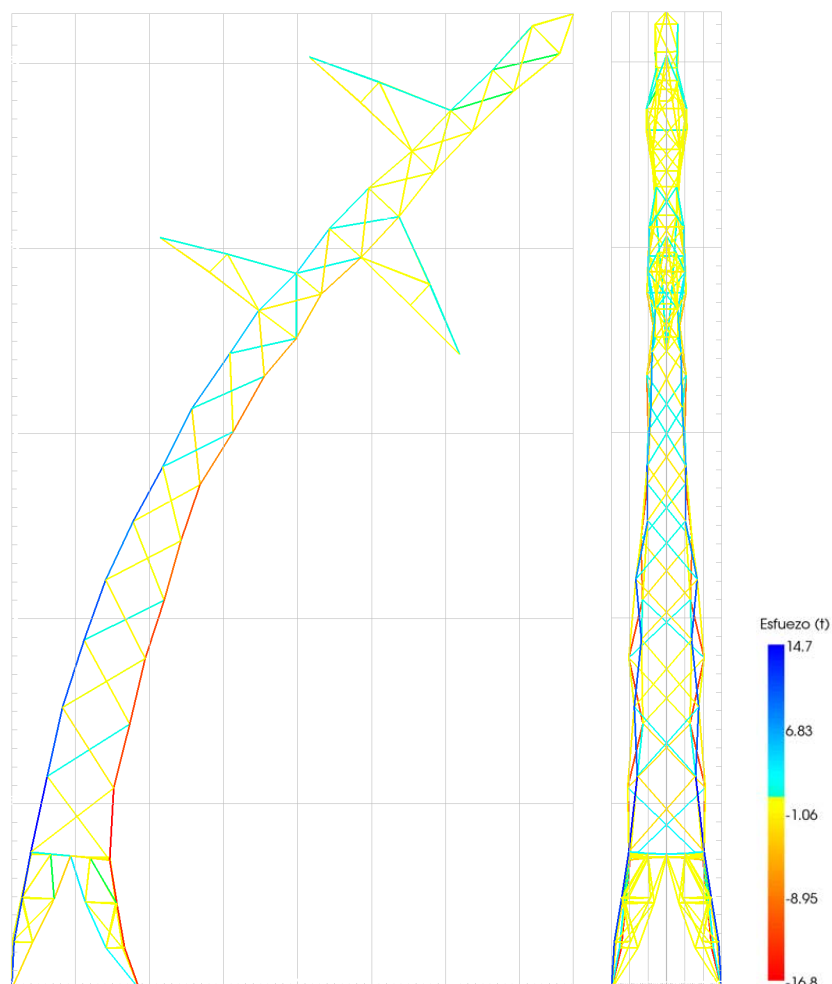


Figura 7.66: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 1, de viento en dirección W.

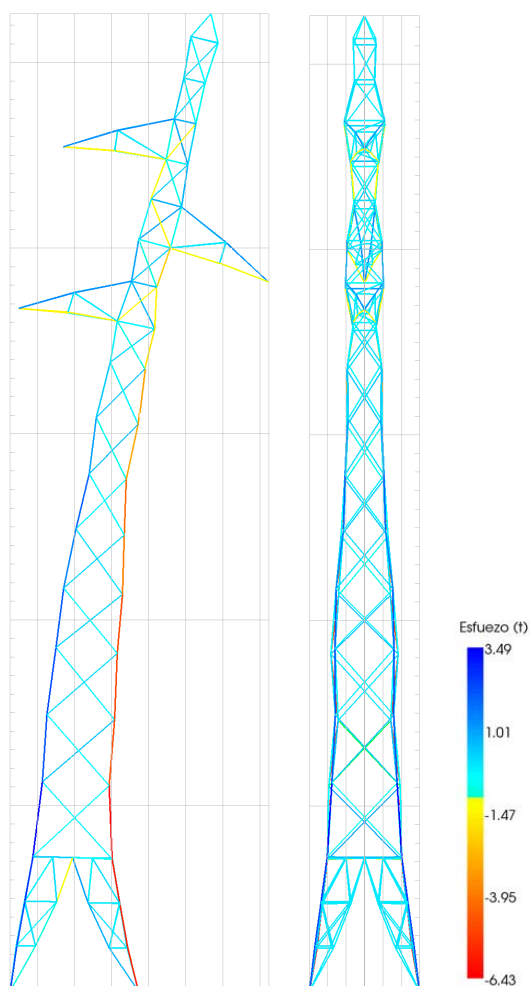


Figura 7.67: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 2.

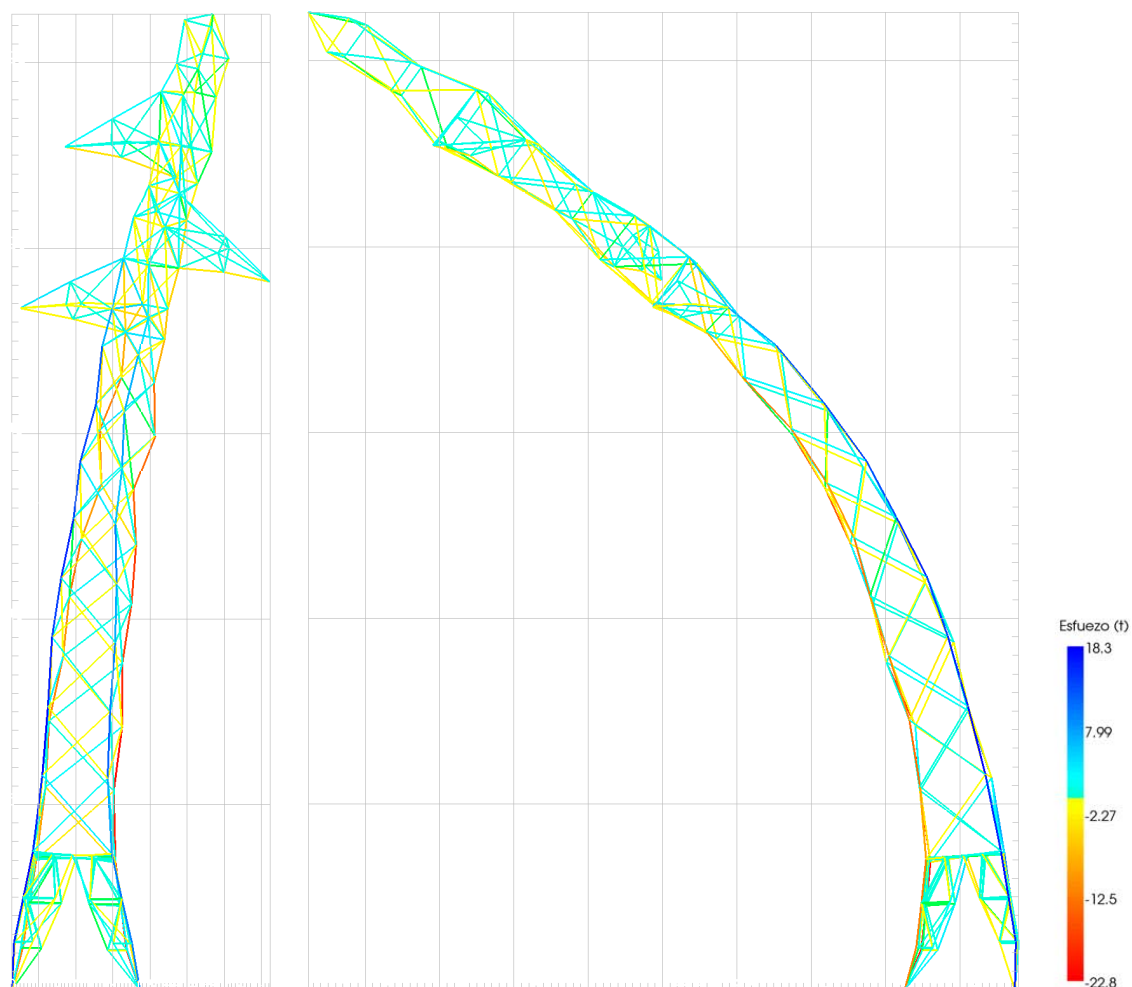


Figura 7.68: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 3.

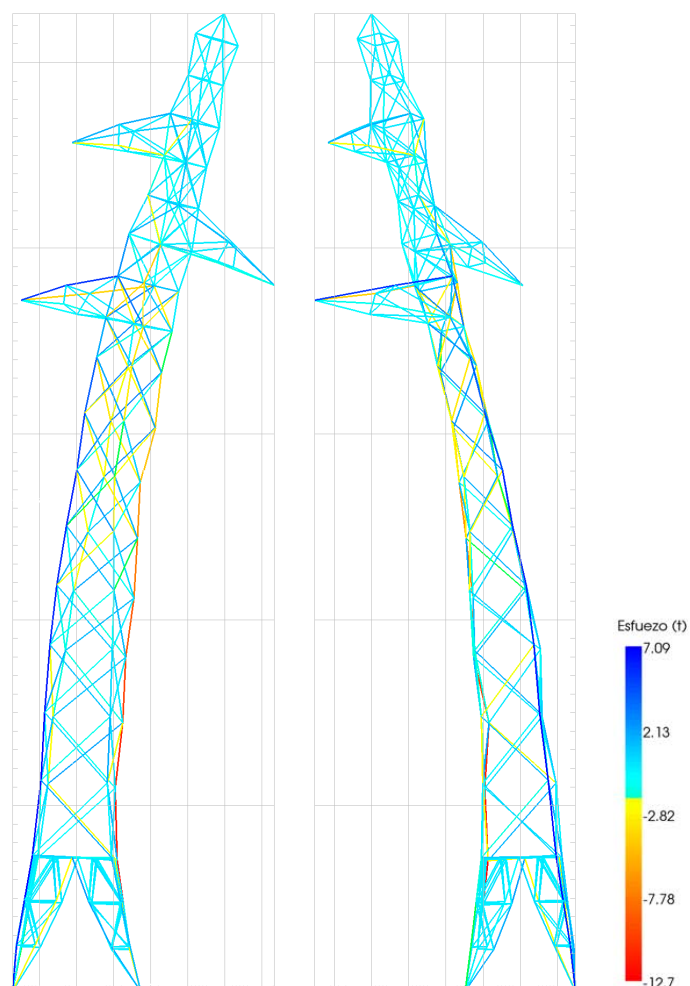


Figura 7.69: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito inferior.

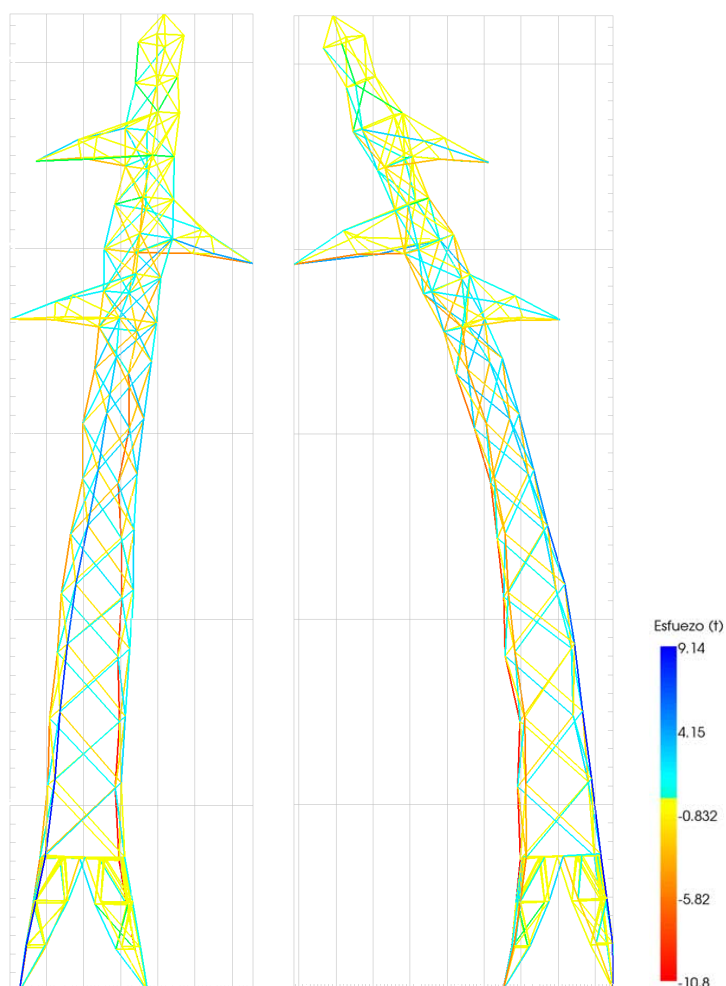


Figura 7.70: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito intermedio.



Figura 7.71: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada al circuito superior.



Figura 7.72: Torre de 132 kV: Geometría deformada con un factor de amplificación de 100 para la hipótesis de carga número 4, rotura de conductor aplicada a los cables de guarda.

De acuerdo con los resultados expuestos, la principal conclusión obtenida de la implementación del algoritmo en el presente ejemplo es el de la necesidad de reinterpretación de la tipología estructural de la torre. Es decir, a tenor de los resultados obtenidos, el algoritmo propone una tipología estructural similar a un fuste, en lugar de la clásica configuración de torre de alta tensión.

Desde el punto de vista del coste computacional, y a tenor de la Tabla 7.16, el algoritmo se detiene tras 1394 iteraciones, que emplean un total de 5183.57 segundos. Comparando el tiempo de computación empleado por el algoritmo con la implementación del análisis de sensibilidad, recogida en la Figura 7.73, se observa que el coste computacional se reduce aproximadamente unas 86 veces.

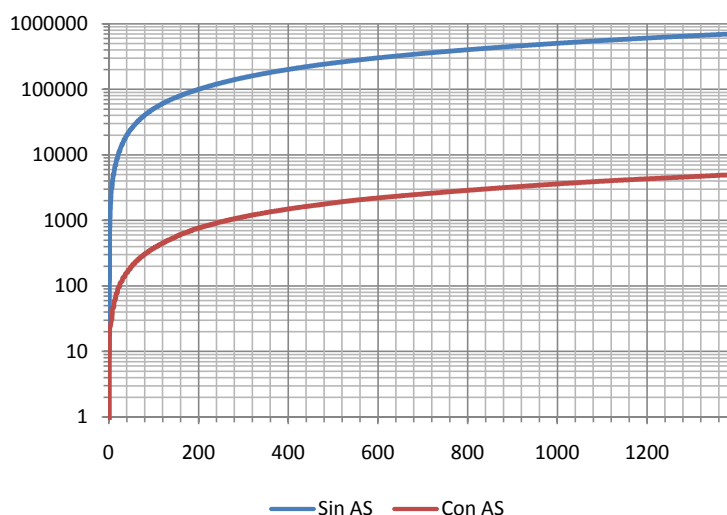


Figura 7.73: Torre de 132 kV: Comparación del tiempo de computación empleado considerando el Análisis de Sensibilidad (AS), o el cálculo directo.

Por otro lado, la temperatura inicial del algoritmo, al igual que en el resto de los ejemplos estudiados, se ha obtenido a partir de una calibración experimental. En el caso que nos ocupa la formulación propuesta en el capítulo 6 proporciona una temperatura inicial de 0.0045, valor que resulta sensiblemente similar al proporcionado por el análisis experimental y que se cifra en 0.0098. En cualquier caso, se recuerda que la expresión recogida en la presente tesis únicamente pretende proporcionar un valor de referencia en torno al cual se debe estudiar el comportamiento del método. Los resultados obtenidos en dicha calibración se pueden consultar en la Figura 7.74.

En este sentido, una vez determinada la temperatura inicial del algoritmo, en la Figura 7.75 se puede observar la evolución del diseño de acuerdo a las iteraciones. De este modo,

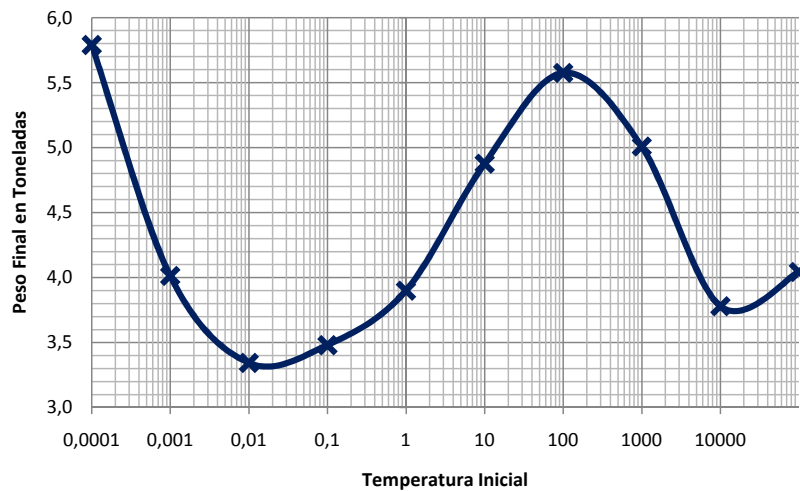


Figura 7.74: Torre de 132 kV: Resultado del algoritmo en función de la temperatura inicial.

se obtiene una curva que relaciona el peso total del diseño con la iteración en la que se obtiene. Al igual que en los ejemplos anteriores, esta curva se ajusta a la tipología definida por White en sus estudios [84], y que se recogió convenientemente en el capítulo 6. En este sentido la curva muestra una parada mucho más atenuada que en los ejemplos anteriores, pudiéndose observar claramente un cambio de pendiente final. De la misma forma, también puede observarse una rama inicial de exploración con una pendiente casi horizontal, seguida de un brusco descenso hacia la convergencia.

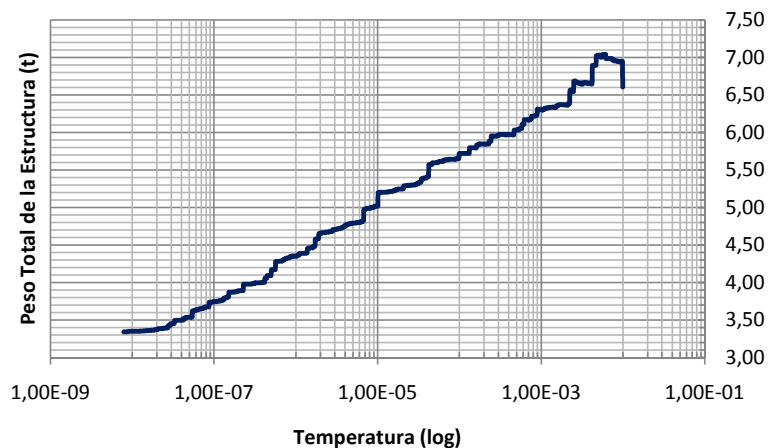


Figura 7.75: Torre de 132 kV: Evolución del algoritmo durante la ejecución.

Por otro lado, el estado condicional del resultado se caracteriza por activar un total de 37 restricciones con el siguiente reparto:

- 14 restricciones de esbeltez seccional.
- 8 restricciones de esbeltez elemental.
- 15 restricciones en esfuerzos.

A tenor de las Figuras 7.76, 7.77 y 7.78, se observa cómo a pesar de que las restricciones en esbeltez elemental son las que menos se activan, son, por el contrario, aquéllas que poseen un mayor número de restricciones que superan el 80 % de aprovechamiento.

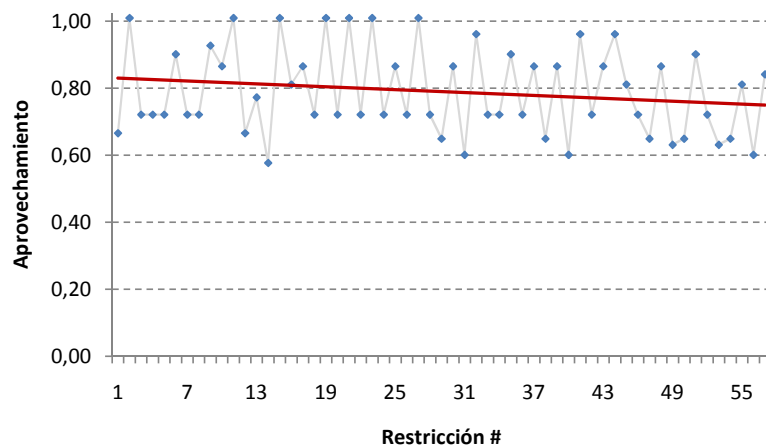


Figura 7.76: Torre de 132 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez seccional.

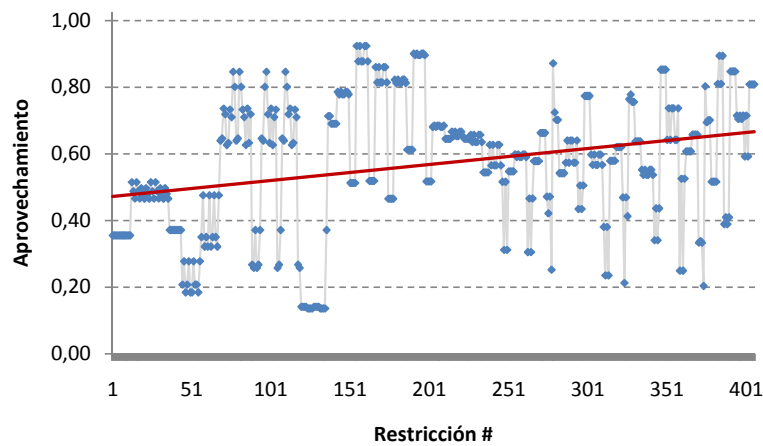


Figura 7.77: Torre de 132 kV: Valor final de las restricciones de esbeltez elemental.

En este sentido, y de acuerdo a la Figura 7.76, se aprecia que la estructura se encuentra fuertemente condicionada por la esbeltez seccional. Este hecho se debe a que, debido a los

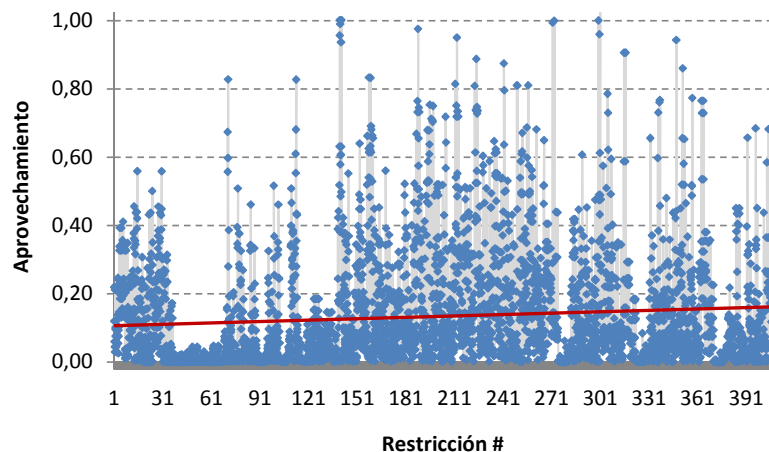


Figura 7.78: Torre de 132 kV: Valor final de las restricciones de esfuerzos.

bajos esfuerzos que solicitan el diseño, las secciones tienden a reducirse hasta tal punto que los posibles efectos derivados de inestabilidades afectan a la clase resistente seccional.

7.5. Conclusiones al Funcionamiento del Algoritmo en los Ejemplos Prácticos

El algoritmo de Kirkpatrick, se basaba en una serie de pruebas aleatorias que permitían de una forma controlada la inspección del entorno incluso elevando el valor de la función objetivo. De este modo en cada iteración, el algoritmo permite desplazamientos de la solución inicial en dos sentidos diferentes:

- Descenso de Valle: todas las direcciones que suponen este comportamiento son libremente aceptadas.
- Ascenso de Colina: en el que las direcciones que generan este desplazamiento serán aceptadas si, y sólo si, se ajustan a una probabilidad que decrece con la temperatura del estado.

De este modo se consigue que conforme avanza el algoritmo, la probabilidad de encontrar una dirección que ascienda colina y sea validada se reduzca, centrando el avance del algoritmo en el descenso estricto de la función objetivo.

El parámetro que controla la inspección del entorno y por ende la evolución del algoritmo es la temperatura. Esta variable indica el estado del proceso de optimización y

controla tanto el inicio como la finalización del algoritmo. Diversos autores han estudiado la convergencia del algoritmo hacia el óptimo global, demostrando que el patrón de enfriamiento debe ajustarse de forma inversamente proporcional al logaritmo de las iteraciones. No obstante este criterio es exageradamente lento, y en la práctica se ha demostrado que otros criterios de mayor velocidad permiten obtener resultados igualmente válidos. En la presente tesis doctoral se ha seguido el esquema de enfriamiento exponencial, utilizado por Kirkpatrick [38] en su estudio, y uno de los más populares entre los autores en la actualidad.

De forma más concreta el algoritmo muestra un comportamiento que se ajusta a la gráfica de la Figura 7.79. Así se puede observar que el comportamiento tiene tres fases o ramas claramente diferenciadas:

- Fase de arranque: en la que el algoritmo oscila en torno a una rama sensiblemente horizontal e inspecciona el entorno del punto inicial hasta alcanzar la dirección de avance que marcará la convergencia del algoritmo.
- Fase de aceleración: fase intermedia en la que se concreta la solución del problema. Se caracteriza por un claro incremento de la pendiente en la curva de evolución del algoritmo.
- Fase de parada: en la que el algoritmo se estabiliza en torno al óptimo generando una rama sensiblemente horizontal.

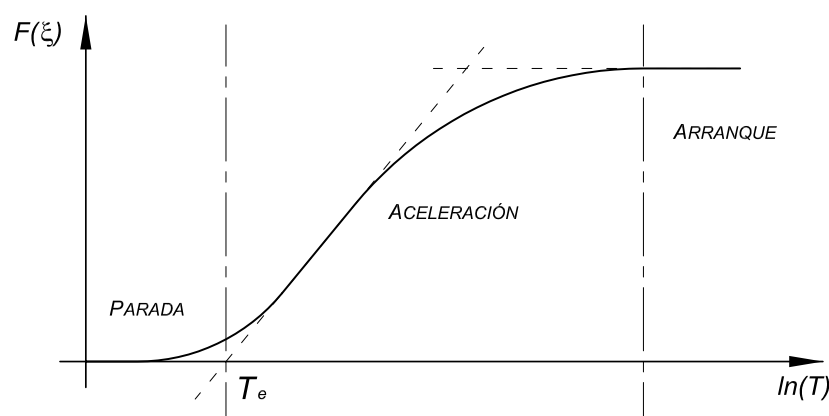


Figura 7.79: Esquema de funcionamiento del Algoritmo de Recocido Simulado.

En cualquier caso, el algoritmo puede llegar a omitir en su desarrollo alguna de las fases, lo cual indica un mal funcionamiento o un ajuste poco preciso de los parámetros del código al problema estudiado. A este respecto, y de acuerdo con la experiencia obtenida en el

desarrollo de la presente tesis doctoral, tanto la fase de arranque como de aceleración deben generarse siempre que el algoritmo pretenda un correcto funcionamiento. En el primero de los casos, el arranque define en gran medida el grado de exploración del entorno de la solución inicial, por lo que es estrictamente necesaria su existencia. Podría darse el caso en el que dicha rama no llegue a generarse de forma efectiva, aunque este tipo de situaciones son características de temperaturas iniciales muy bajas en las que el algoritmo no tiene suficiente temperatura como para encontrar la dirección de máximo descenso y por tanto se ajusta a una dirección que redirige a un posible óptimo local (enfriamiento adiabático).

No obstante, el empleo de temperaturas excesivamente elevadas redundaría en un coste computacional excesivo que no garantiza mejores resultados, tal y como puede comprobarse en la Figura 7.80. A tenor de la Figura 7.79 y de acuerdo a los trabajos de White [84], la temperatura inicial debe ser lo suficientemente elevada como para superar una temperatura límite a partir de la cual el algoritmo se desvía de la dirección principal de descenso. Es por ello que debe garantizarse un cierto equilibrio entre un coste computacional elevado y la necesidad de superar dicha temperatura límite.

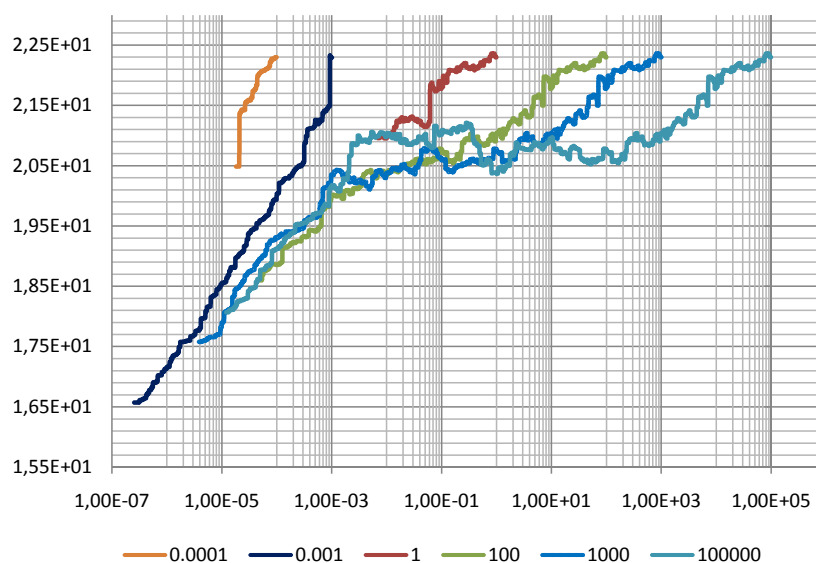


Figura 7.80: Comparación de la evolución del algoritmo para diferentes temperaturas iniciales.

Por otra parte la fase de aceleración, supone la confirmación de que el algoritmo encuentra la dirección de optimización y la acepta. Debido a ello el correcto funcionamiento de la metodología está supeditado directamente a su existencia. No obstante, en el caso de soluciones iniciales muy ajustadas al óptimo global esta fase puede llegar a generarse de manera muy tímida. En cualquier caso, el hecho de que esta etapa del algoritmo no llegue

a desarrollarse, suele ser indicativo de una baja temperatura inicial aunada a una solución inicial próxima a un óptimo local de gran convexidad. En esta situación el algoritmo carece de la suficiente energía como para encontrar la dirección del óptimo global durante la fase de inspección inicial.

Por el contrario, la fase de parada en un problema de optimización con variables mixtas como el que nos ocupa es difícilmente alcanzable si se entiende como una deceleración progresiva del proceso de congelación. Este hecho se debe a que cuanto menor es la temperatura menor es la probabilidad de aceptación de posibles ascensos de colina. Ello aunado a la elevada perturbación que sobre la función objetivo generan las variaciones de las variables discretas, imposibilita este tipo de movimiento en la práctica. De esta forma alcanzar tendencias sensiblemente horizontales o de baja pendiente resulta poco probable. Sin embargo, en el algoritmo propuesto en la presente tesis doctoral este hecho tiende a atenuarse gracias a la implementación del suavizado y la compatibilización entre variables.

No obstante, esta rama suele generarse bruscamente como el resultado de alcanzar un punto óptimo, en donde el algoritmo es incapaz de encontrar una posición del entorno que mejore la situación actual. En este sentido la rama debe generarse en su totalidad, puesto que el criterio de convergencia establece que a lo largo de las últimas iteraciones el diseño ha mantenido la función objetivo.

En el caso de que esta rama no llegue a generarse, ni siquiera en forma de congelación brusca, se pone de manifiesto que el algoritmo se ha detenido antes de llegar a una solución óptima. Habitualmente este hecho indica que el criterio de parada es excesivamente restrictivo y detiene el proceso de optimización en un estado en el que a priori el diseño todavía es mejorable.

En cualquier caso, los ejemplos estudiados en la presente tesis doctoral muestran cómo el algoritmo desarrollado genera las tres ramas especificadas anteriormente. En este sentido, cabe destacar cómo la metodología propuesta desarrolla claramente ramas de aceleración bien definidas, mostrándose las fases de arranque y parada de un modo más tímido. Este hecho es significativo de funcionamientos ajustados a un coste computacional razonable, en el que el grueso del tiempo empleado se centra en la fase de aceleración, reduciendo al mínimo posible el tiempo invertido en la exploración del entorno inicial y en la estabilización final del resultado.

“Buscad leyendo y hallareis meditando.” San Juan de la Cruz (Religioso Español. Fontiveros 1542 - Úbeda 1591)

Capítulo 8

Conclusiones y Trabajos Futuros

8.1. Introducción

A lo largo de una línea área de alta tensión muchos son los puntos en los que se necesita un apoyo firme para la sustentación efectiva del cableado. Es por ello que las estructuras de transporte de energía poseen un carácter marcadamente repetitivo dentro del proyecto de una línea aérea de alta tensión.

Más concretamente, los apoyos de líneas de transporte de energía son estructuras metálicas en celosía generadas a partir de una sucesión modular de boques de barras con una conectividad prefijada, caracterizados por sus dimensiones generales. El acero laminado galvanizado que las compone es uno de los materiales de construcción más caros, por lo que en el presupuesto general de una nueva línea de transporte, la partida destinada a la construcción de los apoyos representa la mayor parte del total.

Por todo ello, un estudio exhaustivo destinado a la reducción del coste total de la estructura supone un ahorro significativo en el montante total del proyecto. Este hecho justifica la optimización de este tipo de estructuras, ya que tanto su repetitividad como su coste individual hacen previsible un ahorro considerable.

El coste total de la estructura está directamente relacionado con el peso total de la torre, aunque puedan advertirse otro tipo de factores que puedan incidir en su precio. Es por ello que aunque puedan considerarse algunos elementos como el material para uniones

u otro tipo de apartamentas accesorias, la función objetivo del problema debe centrarse en la cantidad de material que requerirá la torre.

Desde el punto de vista de la optimización tradicional, el problema de las torres de alta tensión posee una importante singularidad. El hecho de ser una estructura metálica, supone que para conseguir cualquier tipo de ahorro se deba ajustar el diseño a un catálogo de perfiles estándar, que se laminan de forma masiva en las acerías y que por tanto reducen su coste de forma notoria. Por otro lado, las dimensiones generales de cada uno de los bloques están caracterizadas por una total libertad, salvo por unas dimensiones límite que acotan su valor inferior y superiormente.

De este modo, en el problema confluyen dos tipos diferentes de variables: discretas y continuas. Esta convivencia hace particularmente difícil la resolución del problema, ya que los métodos convencionales carecen de sentido y se muestran incapaces de resolver el problema eficazmente.

Otra de las singularidades que caracteriza a este problema, reside en el elevado número de restricciones que acotan el problema, en relación con el número de variables de diseño que posee. La exigencia de verificar una normativa estructural realista, hace que las comprobaciones incidan tanto a nivel seccional como a nivel elemental, y por otro lado que no sea suficiente con el estudio de un único caso de carga, sino que se deban comprobar diferentes estados de sollicitación estructural. Este hecho multiplica considerablemente el número de comprobaciones que restringen el problema.

Tras un estudio exhaustivo y pormenorizado de los diferentes aspectos que caracterizan el comportamiento estructural de este tipo de torres, en la presente tesis se ha obtenido una metodología de optimización que permite, en función del caso, conseguir reducciones en el peso total de la estructura superiores al 20 %. A continuación se exponen las principales conclusiones alcanzadas en la presente tesis, diferenciando entre las relativas al funcionamiento e implementación del algoritmo, y las relacionadas con los resultados obtenidos.

8.2. Conclusiones al Algoritmo Desarrollado

En la presente tesis se ha optado por implementar un algoritmo de optimización estocástica, basado en el algoritmo de Recocido Simulado. La utilización de este tipo de algoritmos, se fundamenta en la coexistencia de variables discretas y continuas en el problema. Este tipo de algoritmos fueron especialmente desarrollados para trabajar con variables discretas.

El Recocido Simulado exige un gran número de recálculos del sistema, suponiendo habitualmente en un encarecimiento computacional de la solución. En la presente tesis

doctoral, con el objeto de agilizar el proceso de optimización, se ha implementado un análisis de sensibilidad de primer orden, que permite realizar las sucesivas pruebas con un coste computacional relativamente bajo. En este sentido, dicho análisis consigue reducir el tiempo total de computación de manera significativa, llegando a reducirlo en más de dos órdenes de magnitud. Esta mejora del algoritmo del Recocido Simulado, permite encarar problemas estructurales de mayor magnitud a los tratados en la actualidad, haciendo posible estudios de optimización desechados hasta el momento.

Por otro lado, el problema de optimización planteado en la presente tesis doctoral, combina variables de naturaleza discreta con variables de carácter continuo. Es por ello que el algoritmo requiere que se le implementen modificaciones para adaptarse plenamente al problema estudiado.

En este sentido, durante la fase de investigación y desarrollo de la metodología expuesta en la presente tesis, se pudo comprobar cómo el rango de variación de la función objetivo debido a las variables discretas es sensiblemente mayor que el de las variables continuas. Del mismo modo, debido a que las direcciones de avance se obtienen de modo aleatorio, resulta especialmente complejo que todas las variables de naturaleza discreta o bien que todas las variables de carácter continuo se anulen. Es por ello que se requiere de un proceso adicional que permita la compatibilización entre variables. Para ello, la metodología propuesta incorpora un proceso de suavizado que permite una mejor exploración del entorno mixto de la función.

En este sentido el proceso de suavizado permite modificar una única variable seccional escogida de forma aleatoria. Este método se aplica siempre que no se consiga encontrar soluciones factibles al modificar las variables seccionales en su conjunto. De este modo, se obtiene un efecto de refinado de la solución final, que garantiza una exploración de la región de estudio más completa y eficaz que en los algoritmos convencionales.

Con todo ello, la variable básica que controla la evolución del algoritmo de recocido simulado es la temperatura. Este hecho motiva que el valor de la temperatura inicial condicione en gran medida el resultado de la optimización. Para evitarlo, el algoritmo desarrollado en la presente tesis se basa en la adimensionalización de la función de energía. De este modo se consigue generalizar el procedimiento reduciendo cualquier tipo de optimización estructural a un problema característico y adimensional. Este problema tipo se obtiene a partir de cuatro factores fundamentales:

- El peso inicial de la estructura.
- El valor de las restricciones entendido como aprovechamiento estructural.

- El valor medio de las restricciones.
- El valor medio de las restricciones incumplidas.

La total adimensionalización del problema se consigue por una parte con el peso inicial, y por otra gracias a la consideración del aprovechamiento estructural como medida de las restricciones. El aprovechamiento estructural de una restricción indica la lejanía o proximidad que se encuentra del límite admisible, por lo que permite de un modo relativamente simple el estudio de las restricciones de un modo adimensional. Este hecho también permite el tratamiento conjunto de restricciones de naturaleza muy diversa, en la que no sólo sus valores pueden llegar a tomar magnitudes muy diferentes, sino que sus variaciones pueden alcanzar dimensiones muy dispares.

De este modo el algoritmo propuesto garantiza el funcionamiento independientemente de las unidades en las que se trate el problema, y permite un tratamiento conjunto eficaz de las restricciones de diversa índole que intervienen en el mismo.

Finalmente la temperatura inicial debe permitir que independientemente del estado inicial de la estructura, el proceso de optimización tienda a un valor similar. Es por ello por lo que se considera el valor medio de las restricciones incumplidas así como el valor medio de las restricciones. El primero es un modo de controlar y acotar los posibles errores derivados del análisis de sensibilidad de primer orden implementado en el algoritmo, mientras que el segundo garantiza que en función de distancia del estado inicial respecto al punto óptimo, el algoritmo incremente el número de iteraciones hasta alcanzar la convergencia entorno al valor deseado. Con esta técnica, la metodología propuesta ha mostrado un funcionamiento eficaz a la hora de encarar la resolución desde diversos puntos de partida, garantizando un punto de convergencia sensiblemente similar en todos los casos estudiados. En el siguiente epígrafe se tratarán con mayor profundidad las conclusiones obtenidas de la implementación del algoritmo y sus resultados.

8.3. Conclusiones a los Resultados Obtenidos

De los ejemplos analizados se puede concluir que el algoritmo propuesto en la presente tesis doctoral optimiza diseños actuales de torres de alta tensión. De los resultados obtenidos se puede observar como el procedimiento modifica tanto las variables geométricas como las variables seccionales, consiguiendo reducciones muy significativas del peso total de la estructura. En este sentido, de forma generalizada el algoritmo tiende a incrementar la esbeltez general del fuste de la torre, de forma que las barras principales que sustentan la capacidad portante de la estructura, montantes, apenas varían su longitud. No obstante las diagonales

y otras barras de carácter secundario se acortan significativamente, incrementando así su resistencia a esfuerzos de compresión.

Del mismo modo se observa como en las crucetas, las barras inferiores tienden a reducir su longitud, dado que son las que soportan una mayor compresión, mientras que las barras traccionadas tienden a incrementar su aprovechamiento aumentando su longitud.

Por otro lado, también se observa en los ejemplos 1 y 2 que los módulos que conectan la base con las crucetas tienden a adaptarse a una geometría parabólica, hecho que sugiere la importancia de los esfuerzos compresivos en el problema. Por el contrario el ejemplo de aplicación 3 tiende a generar geometrías muy esbeltas. De hecho se puede observar que la propia solución realmente sugiere un cambio de tipología hasta obtener un fuste recto sin módulo base. Este hecho se debe principalmente a la baja carga a la que está sometida la estructura. A pesar de que las cargas se han obtenido de los catálogos comerciales, resulta significativamente interesante como el propio algoritmo es capaz de proponer cambios en la tipología estructural. Este hecho extiende la aplicabilidad del método hacia el campo de la optimización topológica, de forma que con pequeños cambios, el algoritmo propuesto sería capaz de modificar la topología estructural de la torre.

Por otro lado y desde el punto de vista seccional, se observa que el procedimiento tiende a retirar material de las barras con una menor participación estructural, secundarias y redundantes, con el objeto de poder reducir el peso global de la estructura. Este fenómeno aligera considerablemente el apoyo, posibilitando a su vez la reducción de las barras principales o montantes.

Desde el punto de vista computacional, se observa como el algoritmo todavía conserva un coste considerable en lo que a tiempo de computación se refiere, a pesar de la importante reducción que genera el análisis de sensibilidad implementado, y que alcanza hasta dos órdenes de magnitud. En cualquier caso y dado el avance de las técnicas de computación, así como el avance técnico en la velocidad y capacidad de la informática hace posible que en un período relativamente corto este tipo de análisis puedan llevarse a cabo en tiempo real. No obstante hay que destacar que se trata en todo momento, de problemas reales analizados desde un punto de vista global, con multitud de casos de carga diferentes y un gran número de restricciones actuantes, procurando siempre el cumplimiento de la normativa vigente y considerando en el estudio el procedimiento constructivo de este tipo de estructuras.

8.4. Conclusiones Generales

Con todo ello el procedimiento expuesto en la presente tesis se ha mostrado muy eficaz, permitiendo una reducción efectiva del material y proporcionando geometrías conceptual-

mente coherentes. En este sentido la aplicación del algoritmo desarrollado permitiría un ahorro significativo en este tipo de estructuras, abaratando los costes de producción de la torre sin menoscabo alguno de su capacidad resistente.

Este hecho resulta particularmente importante dado que el colapso de este tipo de estructuras (Figura 8.1), no sólo conllevan el coste derivado de su reposición, sino que suponen un elevado importe por la interrupción del servicio, pudiendo llegar a ser este último especialmente elevado y habitualmente superior al coste de la reposición en sí.



Figura 8.1: Algunos ejemplos de colapso de torres de alta tensión.

En este sentido, los ahorros obtenidos en el peso total de las estructuras superan el 20 % respecto al peso inicial, hecho que pone de manifiesto el buen comportamiento del algoritmo. Además, los resultados obtenidos muestran como el algoritmo es capaz de proponer, en ciertos casos, modificaciones topológicas en la geometría inicial, extendiendo la potencial aplicación del algoritmo a campos de optimización más extensos.

Desde el punto de vista algorítmico, las principales aportaciones de la metodología propuesta en la presente tesis doctoral son:

- Incorporación del análisis de sensibilidad.
- Compatibilización entre variables discretas y continuas.
- Total adimensionalización del algoritmo.

La primera de ellas, permite una reducción total del coste computacional del algoritmo en más de dos órdenes de magnitud. Este hecho posibilita la implementación realista de problemas de ingeniería mucho más complejos de los tratados hasta el momento. El tiempo de computación es un parámetro fundamental para la rentabilidad de este tipo de análisis, puesto que encarar un análisis masivo para la optimización de este tipo de estructuras sin un coste temporal razonable carece de sentido. En este sentido, el algoritmo propuesto, permite una reducción muy significativa del tiempo computacional invertido, haciendo rentable el tratamiento de este tipo de problemas.

Por otro lado, las estructuras consideradas se caracterizan por estar definidas por un gran número de variables discretas, entre otras. Para garantizar la correcta armonía entre las variables de diversa naturaleza que intervienen en el problema, el algoritmo incorpora un método de compatibilización que permite una mejor exploración del entorno de diseño del problema. En este sentido, la metodología considerada ha mostrado un correcto funcionamiento en la compatibilización de ambos tipos de variables, permitiendo una correcta exploración del entorno de las variables discretas y mostrando una gran eficacia en la adaptación de las variables continuas.

La última de las aportaciones descritas, permite independizar el funcionamiento del algoritmo tanto de la solución inicial considerada como del tipo de estructura analizada. Del mismo modo, permite aglutinar la información relativa a las diversas restricciones que condicionan el problema, evitando posibles errores de escalado y magnitud.

Finalmente, debe resaltarse que un análisis tan completo como el presentado en la presente tesis doctoral no ha sido considerado en los estudios tradicionales de optimización, en los que se asumen varias simplificaciones que permiten un tratamiento numérico convencional. Este hecho supone que los resultados obtenidos se alejen de la realidad, perdiendo el análisis su utilidad práctica. Es ahí en donde reside una de las principales aportaciones de la tesis doctoral que se presenta, ya que el estudio de optimización propuesto analiza de modo global el comportamiento estructural de un apoyo de transporte de energía, asumiendo la totalidad de las restricciones consideradas en la normativa vigente. Es decir, el resultado final obtenido, es totalmente compatible con la normativa vigente, por lo que se puede aplicar directamente a los diseños estandarizados de compañías eléctricas.

8.5. Trabajos Futuros

Pese a la aplicación práctica que el algoritmo presentado posee en este momento, existen algunos aspectos en los que se puede incidir para mejorar y robustecer el procedimiento. A continuación se exponen algunos de los aspectos en los que plantear algunos trabajos futuros:

- Extensión del planteamiento estructural a un modelo de nudos semirrígidos, en el que se introduzcan los efectos de la flexión.
- Introducir aspectos relacionados con el cálculo y el diseño de las uniones.
- Plantear la optimización no sólo como peso, sino como coste total de la estructura, estudiando el importe real de cada uno de los perfiles y el potencial coste de las uniones.
- Estudiar detalladamente la convergencia del algoritmo, planteando posibles esquemas de enfriamiento alternativos.
- Avanzar en la adimensionalización del algoritmo, con el objeto de generar un procedimiento totalmente generalizado que permita reducir cualquier problema de optimización a un problema tipo adimensional.
- Estudiar la rentabilidad de implementar análisis de sensibilidad de segundo orden, analizando la reducción efectiva en el coste computacional del cálculo.
- Evaluar la posible implementación de algoritmos de cálculo en paralelo, para permitir la reducción del tiempo de computación.
- Plantear algoritmos de suavizado más sofisticados que permitan compaginar de manera sencilla y eficaz variables de tipo continuo y discreto.
- Finalmente introducir como variable dentro del problema de optimización, la propia conectividad nodal, para definir no sólo la geometría y las secciones de la torre, sino su propia distribución elemental.
- Estudiar la implementación de sucesivos recalentamientos sobre la metodología y las soluciones obtenidas.
- Evaluar el posible refinado de las soluciones, aplicando técnicas convencionales de optimización a las variables continuas del problema.

Bibliografía

- [1] Alarcón E., Álvarez R. y Gomez M. S., Cálculo Matricial de Estructuras., 1990.
- [2] Alcalá J., Carrera M., González Vidoso F., Yepes V., Cristalización simulada aplicada a la optimización económica de muros ménsula de contención de hormigón armado., *Hormigón y Acero*, **236**:97–108, 2005.
- [3] Anily S. y Federgruen A., Ergodicity in Parametric Nonstationary Markov Chains: An Application to Simulated Annealing Methods., *Operations Research*, **35**(6):867–874, 1987.
- [4] American Society of Civil Engineers., ASCE 1097: Design of Latticed Steel Transmission Structures., 1997.
- [5] American Society of Civil Engineers., ASCE Manual 52: Design of Steel Transmission Towers., 1988.
- [6] Bernouilli J., Letter to Leibnitz on beams of uniform strength., 1687.
- [7] Box, M.J., A new method of constrained optimisation and comparison with other methods. *Computer Journal*, **8**: 42-52, 1965.
- [8] Carrera M., Alcalá J., Yepes V., González Vidoso F., Optimización heurística de pórticos de paso de carretera de hormigón armado., *Hormigón y Acero*, **236**:85–95, 2005.
- [9] Castillo E., Conejo A.J., Pedregal P., García R. y Alguacil N., Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia., 2002.
- [10] Castro R., *Optimização de Estruturas com Multiobjetivos via Algoritmos Genéticos*, PhD Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- [11] Cerny V., Thermodynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An efficient Simulation Algorithm., *Journal of Optimization. Theory and Applications*, **45**(1):41–45, 1985.

- [12] Clausen T., Column of minimum weight., 1851.
- [13] Comité Técnico AEN/CTE 207 de Transporte de Energía Eléctrica., UNE EN 50421 Líneas eléctricas aéreas de mas de 1 kV de c.a. y hasta 45 kV., 2005.
- [14] Comité Técnico AEN/CTE 207 de Transporte de Energía Eléctrica., UNE EN 50341 Líneas Eléctricas Aéreas de más de 45 kV en Corriente Alterna., 2001.
- [15] Comité Técnico AEN/CTN 140: 89., UNE EN 1993 Eurocódigo N°3: Proyecto de Estructuras de Acero., 1993.
- [16] Comité Técnico AEN/CTN 140: 89., UNE EN 1993 Eurocódigo N°3: Proyecto de Estructuras de Acero., 2008.
- [17] Computers and Structures Inc., SAP2000 Advanced I: Static and dynamic finite element analysis of structures., 2006.
- [18] Cruz J.R., Dorea C.C.Y., Simple Conditions for the Convergence of Simulated Annealing Type Algorithms., *Journal of Applied Probability*, **35(4)**:885–892, 1998.
- [19] Choi K. y Kim N., Structural sensitivity analysis and optimization., 2005.
- [20] Felix J. y Vanderplaats G.N., Configuration optimization of trusses subject to strength, displacement and frequency constraints. *Revista de Obras Públicas*, Trans. ASME J. Mechs., Transmiss. Automn Des., **109(2)**:233–241, 1987.
- [21] Fernández Casado C., Teoría del Arco. *Revista de Obras Públicas*, **79**:287–292, 1931.
- [22] Fogel L.J., Owens A.J., and Walsh M.J., Artificial Intelligence through Simulated Evolution. *John Wiley & Sons, New York*, 1966.
- [23] Galileo G.L, Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuovo Scienze Attenenti alla Meccanica et i Movimenti Locali., 1638.
- [24] Geman D. y Geman S., Stochastic Relaxation, Gibbs Distribution and the Bayesian Restoration of Images., *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-6(3)**:721–741, 1984.
- [25] Gidas B., Nonstationary Markov Chains and Convergence of the Annealing Algorithm., *Journal of Statistical Physics*, **31(1)**:73–131, 1985.

- [26] González Vidosa F., Yepes V., Alcalá J., Carrera M., Perea C., Simulated annealing optimization of walls, portal and box reinforced concrete road structures., *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering (OPTI-2005)*, Skiathos, Grecia, 2005.
- [27] Heyman J., Análisis de Estructuras. Un estudio histórico, 2004.
- [28] Hanssen L., Computer program system for design of power transmission towers., *11th. ONR Naval Structural Mechanics Symposium*, **12**:37—45, 1981.
- [29] Hajek B., Cooling Schedules for Optimal Annealing., *Mathematics of Operations Research*, **13**:311—329, 1988.
- [30] Hernández, S., Métodos de Diseño Óptimo de Estructuras, 1990.
- [31] Hillier F. y Liberman G., Introducción a la investigación de operaciones, 2002.
- [32] Holland J., Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence., *Ann Arbor, MI: University of Michigan Press*, 1975.
- [33] Instituto Técnico de la Estructura de Acero., Programa Europeo de Formación en Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero., 2000.
- [34] International Electrotechnical Commission, Design Criteria of overhead transmission lines., 2003.
- [35] Kantoróvich L. V., Métodos Matemáticos para la Organización y la Producción., 1939.
- [36] Kantoróvich L. V., Sobre la Transferencia de Masas., 1942.
- [37] Karush W., Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Constraints. *M.Sc. Dissertation 1939*. Dept. of Mathematics, Univ. of Chicago, Illinois, USA, 1939.
- [38] Kirkpatrick S., Gelatt, C. D. y Vecchi M. P., Optimization by Simulated Annealing., *Science, New Series*, **220(4598)**:671—680, 1983.
- [39] Klein B., Direct use of extremal principles in solving certain optimization problems insolving inequalities., 1955.
- [40] Kuik R. y Salomon M., Multi-Level Lot Sizing Problem: Evaluation of a Simulated Annealing., *European Journal of Operational Research*, **45(1)**:25—37, 1990.

- [41] Kuhn H.W., Tucker A.W., Nonlinear programming., *Proceedings of 2nd Berkeley Symposium. University of California Press*, Berkeley, USA, 1951.
- [42] Lagrange J.L., Sur la figure des colonnes., 1770.
- [43] Lagrange J.L., Sur la force des ressorts pliés., 1773.
- [44] Ledesma S., Aviña G. y Sánchez R., Practical Considerations for Simulated Annealing Implementation., *Simulated Annealing*, **20**:401—420, 2008.
- [45] Levy M., La statique et ses applications aux constructions., 1875.
- [46] Lundy M. y Mees A., Convergence of an Annealing Algorithm., *Mathematical Programming*, **34**:111–124, 1986.
- [47] Majid K.I. y Tang X., Optimun design of pin-jointed space structures with variable shape., *Structural Engineer*, **62**:31–37, 1984.
- [48] Markowitz H., Portfolio Selection., *Journal of Finance*, **7(1)**:77–91, 1952.
- [49] Martí J.V., Diseño Óptimo de Tableros Isostáticos de Vigas Artesas Prefabricadas Pretensadas., PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2010.
- [50] Martínez S., Moret V., Colominas I., Modelo Difuso para la Apertura de Compuertas del Aliviadero de una Presa., Proyecto Técnico, Universidade da Coruña, España, 2007.
- [51] Maxwell C., On reciprocal figures and diagram forces., *Scientific Papers I*:514–525, 1864.
- [52] Maxwell C., On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames., *Scientific Papers I*:598–604, 1864.
- [53] Medina J.R., Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing., *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **127**:213–221, 2001.
- [54] Metropolis N., Rosenbluth A. y Rosenbluth N., Equation of State Calculations by Fast Computing Machines., *Journal of Chemical Physics*, **21**:1081–1097, 1953.
- [55] Michell A.G.M., The limit of economy of material in frames structures., 1904.
- [56] Mitchell W. J. y Cagan J., Optimally directed shape generation by shape annealing., *Environment and Planning B*, **20**:5–12., 1993.

- [57] Ministerio de Fomento. Dirección General de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo., RD 1829/1995 NBE-EA-1995 Estructuras de Acero en la Edificación., *Boletín Oficial del Estado del 18 de Enero del 1995*, **1**:1414–1620, 1995.
- [58] Ministerio de Industria, D 3151/1968, Reglamento de Líneas Eléctricas Aéreas de Alta Tensión., *Boletín Oficial del Estado del 28 de Diciembre del 1968*, **1**:18767–18782, 1968.
- [59] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, RD 223/2008 Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión y sus instrucciones técnicas complementarias ITC-LAT 01 a 09., *Boletín Oficial del Estado del 15 de Febrero del 2008*, **1**:16436–16554, 2008.
- [60] Ministerio de Vivienda, RD 314/2006 Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural: Acero., *Boletín Oficial del Estado del 17 de Marzo del 2006*, **1**:11816–16554, 2006.
- [61] Moreno J., Garnacho F., Simón P. y Rodríguez J., Reglamento de Líneas de Alta Tensión y sus Fundamentos Teóricos., 2008.
- [62] Moret V., Alonso A., Cabrero M., Guijarro B. y Mosqueira. E., Fundamentos de la Inteligencia Artificial., 2005.
- [63] Navarrina F., *Una metodología general para optimización estructural en diseño asistido por ordenador*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1987.
- [64] Navarrina F., Valera A., Paris J., Colominas I. y Casteleiro M., Optimization of High Tension Towers by Sequential Linear Programming with Quadratic Line Search, *Proceedings of the "Ninth International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering*, Skiathos, Grecia, 2005.
- [65] Orsila H., Salminen E. y Hämäläinen T.D., Best Practices for Simulated Annealing in Multiprocessor Task Distribution Problems., *Simulated Annealing*, **16**:321–342, 2008.
- [66] Otten R.H.J.M. y Van Ginneken L.P.P.P., Stop Criteria in Simulated Annealing., *Proceedings of the 1988 IEEE International Conference on Computer Design*, Rye Brook (NY), USA, pp. 549–552, 1988.
- [67] Parent A., Des résistances des poutre, et des poutres de plus grande résistance indépendamment de tout système physisque., 1708.
- [68] Parent A., Des points de la rupture des figures. D'en déduire celles qui sont partout d'une résistance égale., 1710.

- [69] Paris J., Restricciones en Tensión y Minimización del Peso: Una metodología general para la optimización topológica de estructuras., PhD Thesis, Universidad de La Coruña, España, 2007.
- [70] Payá I., Yepes V., Clemente J., González Vidosa F., Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, **22(3)**: 241-259, 2006.
- [71] Pearson C.W., Structural design by high speed computing machines., *Proceeding of the First Conference on Electronic Computation*, New York, USA, pp. 417–436, 1958.
- [72] Perea C., Payá I., Yepes V., González Vidosa F., Heuristic optimization of reinforced concrete road bridges and frames. *Proceedings 2th Congreso FIB*, Nápoles, Italia, 2006.
- [73] Prekopa A., Stochastic Programming., 1995.
- [74] Powell, M.J.D., An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *Computer Journal*, **7(2)**: 155-162, 1964.
- [75] Raj P.P. y Durant S.O., Optimum Structural design by dynamic programming., *Journal of the. Structural Division, ASCE*, **102**:1575–1589, 1976.
- [76] Saka M.P., Optimum design of space trusses with buckling constraints., *Proceedings of the 3rd International Conference on Space Structures*, Univ. of Surrey, Guildford, U.K., 1984.
- [77] Schmitt L.A., Structural design by systematic synthesis., *Second Conference on Electronic Computation*, Pittsburg, USA, pp. 105–132, 1960.
- [78] Shea K., Zaho X., A novel noon mark cantilever support: from design generation to realization., *Proc. of IASS 2004 Shell and Spatial Structures from Models to Realization*, Montpellier, Francia, 2004.
- [79] Sheppard D.J. y Palmer A.C., Optimal design of transmission towers by dynamic programming., *Computers & Structures*, **1(2)**:455–468, 1972.
- [80] Tarrech R., Algoritmos de Programación Matemática en Optimización Estructural., 1990.
- [81] Valera A. y Navarrina F., Diseño asistido óptimo por ordenador de estructuras articuladas: Aplicación al caso de las torres de alta tensión., 1991.

- [82] Vieswara Rao G., Optimun Design for Transmission Lina Towers., *Computers & Structures*, **57(1)**:81–91, 1995.
- [83] Wah B. W., Chen Y. and Wang T., Theory and Applications of Simulated Annealing for Nonlinear Constrained Optimization., *Simulated Annealing*, **9**:155–187, 2008.
- [84] White S.R., Concepts of Scale in Simulated Annealing., *Proc. IEEE International Conference on Computer Design*, Port Chester, USA, pp. 646–651, 1984.
- [85] Yepes, V., Alcalá J., Perea C., González-Vidosa F., Estudio paramétrico de muros óptimos de contención de hormigón armado., *PIngeniería Civil* **142**:129–139, 2006.
- [86] Zadhe L., Fuzzy Sets., *Information and Control*, New York: Academic Press, **8**:338–353, 1965.
- [87] Zadhe L., Fuzzy Sets., *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engenieering*, pp. 338–353, 1969.
- [88] Zadhe L., Knowledge Representation in Fuzzy Logic., *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engenieering*, **1(1)**:89–100, 1989.